

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE ENXEÑARÍA



Escola
Técnica
Superior
de Enxeñaría

TRABAJO DE FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO
MEDIANTE DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE
ETANOL

Carlos Manuel Corral Casas

Julio 2018

“Lo mismo es el pensar que el ser”

Parménides de Elea, siglo VI-V a.C.

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I. MEMORIA

- Anexo I. Balances de materia y energía
- Anexo II. Cálculos justificativos
- Anexo III. Códigos implementados en Matlab
- Anexo IV. Análisis de viabilidad económica
- Anexo V. Fichas de seguridad¹

DOCUMENTO II. PLANOS

DOCUMENTO III. PLIEGO DE CONDICIONES²

DOCUMENTO IV. ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

DOCUMENTO V. PRESUPUESTO

¹ Las fichas de seguridad completas se presentarán en la versión digital. En la versión física se adjuntará un breve resumen de dos páginas.

² Solamente se adjuntará en la versión digital.

DOCUMENTO I: MEMORIA

Contenido

1.	Objeto y alcance	4
2.	Justificación	5
3.	El producto: acetato de etilo	6
3.1	Contexto histórico	6
3.2	Características	6
3.3	Propiedades	7
3.3.1	Propiedades físicas	7
3.3.2	Propiedades químicas: la reactividad de los ésteres	8
3.3.3	Propiedades termodinámicas	12
3.4	Aplicaciones	12
4.	Estudio de mercado	14
5.	Análisis de alternativas de producción	17
5.1	Esterificación de Fischer	17
5.2	Reacción de Tishchenko a partir de dos moléculas de acetaldehído	18
5.3	Proceso Wacker-Hoechst + Reacción de Tishchenko	19
5.4	Oxidación de etanol	23
5.5	Alquilación de ácido acético con etileno	24
5.6	Deshidrogenación de etanol	25
6.	Selección justificada de la alternativa de producción: proceso, reactivos, catalizador y sección de separación.	28
7.	Estudio de viabilidad técnica	36
7.1	Viabilidad de la tecnología seleccionada	36
7.2	Disponibilidad de materias primas y venta de productos	37
7.3	Disponibilidad de utilidades	38
7.4	Disponibilidad de equipos	39
7.5	Seguridad en la instalación	39
7.6	Estudio económico básico: cálculo del beneficio bruto	40
8.	Emplazamiento	42
8.1	Climatología de la zona	45
9.	Descripción del proceso	46
9.1	Compuestos químicos	48
9.1.1	Bioetanol	48
9.1.2	Acetaldehído	50
9.1.3	Hidrógeno	52
9.1.4	Acetaldol	53

9.1.5	Fluido térmico: Dowtherm Q	53
9.1.6	Líquido iónico: metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio.....	55
9.1.7	Corrientes auxiliares.....	56
9.2	Condiciones óptimas de operación: estudio termodinámico	56
10.	Descripción de la instalación	62
10.1	Sección 100: acondicionamiento de los reactivos	62
10.2	Sección 200: zona de reacción	63
10.3	Sección 300: acondicionamiento de los productos de reacción	63
10.4	Sección 400: zona de separación	64
10.5	Otras secciones	64
11.	Control e instrumentación	65
11.1	Introducción al control de procesos químicos	65
11.2	Diseño genérico de un lazo de control.....	66
11.3	Terminología técnica	67
11.4	Configuraciones de control	69
11.5	Algoritmos de control.....	70
11.5.1	Control on-off.....	70
11.5.2	Modo proporcional	70
11.5.3	Modo integral.....	72
11.5.4	Modo proporcional-integral.....	73
11.5.5	Modo derivativo	74
11.5.6	Modo PID: proporcional-integral-derivativo	75
11.6	Ajuste de controladores feedback	75
11.6.1	Respuesta del controlador	76
11.6.2	Criterios basados en el error	77
11.6.3	Métodos de sintonización	77
11.7	Nomenclatura.....	78
11.8	Lazos de control	79
11.8.1	Acondicionamiento de la alimentación: sección 100.....	79
11.8.2	Reacción: sección 200	81
11.8.3	Acondicionamiento productos reacción: sección 300	83
11.8.4	Zona de separación: sección 400	84
12.	Normas y referencias	88
12.1	Legislación relativa a la seguridad industrial.....	88
12.1.1	Legislación europea.....	88
12.1.2	Legislación nacional.....	88

12.2	Legislación relativa a la seguridad e higiene laboral	89
12.2.1	Legislación europea.....	89
12.2.2	Legislación nacional.....	89
12.3	Legislación medioambiental.....	90
12.3.1	Legislación europea.....	90
12.3.2	Legislación nacional.....	90
12.4	Normas de construcción	91
12.5	Códigos de diseño generales.....	91
13.	Seguridad en diseño y en la operación	92
13.1	Inventario de sustancias.....	92
13.2	Clasificación NFPA de las sustancias	93
13.3	Clasificación de la instalación según Directiva Seveso	94
13.4	Estudio de reactividad química descontrolada	96
13.4.1	Método CHETAH.....	96
13.4.2	Método de balance de oxígeno.....	98
13.4.3	Matriz de compatibilidad química.....	99
13.5	Identificación de peligros y análisis de riesgos	100
13.6	Dimensionamiento válvulas de alivio.....	101
13.7	Distancias de seguridad.....	103
13.8	Índice DOW de incendio y explosión.....	105
14.	Bibliografía	112

1. Objeto y alcance

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de una planta de producción de acetato de etilo mediante la deshidrogenación catalítica de bioetanol. Esta reacción se sustentará en un catalizador basado en *pellets* cilíndricos de cobre y cromito de cobre, CuCr_2O_4 (catalizador de Adkins) empleando alúmina como soporte y cromato de bario como promotor para así aumentar la actividad y la selectividad del catalizador, además de fomentar una mayor estabilidad del mismo en tanto a su resistencia a la desactivación. La planta de producción se diseñará para una capacidad anual de 50 000 toneladas/año, dado que este es un valor factible para complejos industriales de esta tipología según la información consultada en la bibliografía.

En las cuestiones de diseño el documento se centrará principalmente en la etapa de reacción, puesto que los avances en la investigación del catalizador han sido claves para posibilitar el desarrollo tecnológico que permite la implantación industrial del proceso en cuestión. No obstante, es un proceso novedoso y estudios más específicos y profundos han de ser realizados con el fin de optimizar el proceso de *scale-up*.

Asimismo, con la realización de este Trabajo Fin de Grado el alumno Carlos Manuel Corral Casas opta al título de Graduado en Ingeniería Química por la Universidad de Santiago de Compostela.

2. Justificación

La elección de este proceso para realizar el Trabajo Fin de Grado se basa en las siguientes competencias transversales, adquiridas a lo largo de la formación académica:

- Una mentalidad abierta en tanto a la búsqueda de nuevas maneras de acometer un proceso, siempre que las mejoras con respecto a los métodos tradicionales sean obvias y estén debidamente justificadas.
- Una elevada creatividad para poder diseñar las secciones de la planta sin depender exclusivamente de enciclopedias o monografías respetando en todo caso los principios físicos o químicos que rijan los mecanismos que gobiernan la operación a gran escala, empleando como apoyo trabajos científicos que den sustento a las propuestas personales.
- Una visión sostenible de la Industria, considerando ésta como un medio que tiene la sociedad para satisfacer sus necesidades personales de tal manera que las de las generaciones futuras no se vean comprometidas. Asimismo, la planta de proceso ha de ser respetuosa con el medio ambiente impulsando una filosofía *verde* tanto en la operación como en la gestión de los compuestos químicos implicados en el total de la operación.

En adición a esto, se ha buscado un proceso relativamente sencillo de acometer: pocos reactivos, un solo reactor, una sección de separación que preferiblemente incluya únicamente columnas de destilación y una corriente de reciclo fácil de gestionar. Teniendo en cuenta todos estos puntos y considerando que el mercado del acetato de etilo se encuentra en gran auge (disolvente universal con unas características muy agradables para el manejo del ser humano) la libre elección del proceso fue una tarea más sencilla de lo inicialmente previsto.

3. El producto: acetato de etilo

3.1 Contexto histórico

Hay bastante desinformación en tanto al descubrimiento de los ésteres, ya que muchos científicos los manipulaban en el pasado sin tener conocimiento exacto de los compuestos con los que trabajaban. De hecho, desde un punto de vista etimológico la palabra éster proviene del alemán *Essig-Äther* (éter de vinagre) que es como se conocía antiguamente al acetato de etilo. Este término fue acuñado por primera vez a mediados del siglo XIX por el científico germano Leonard Gmelin. Al tratarse pues de un éster su obtención habitual se lleva a cabo mediante una reacción de esterificación entre el ácido acético y el etanol (esterificación de Fischer en medio ácido) (1).

El acetato de etilo (o etanoato de etilo) es un subproducto de la fermentación y aparece de forma natural en las frutas (los ésteres tienen olores agradables para el ser humano) o en el vino (esterificación del ácido acético con el etanol generado en la fermentación). A bajas concentraciones puede potenciar el sabor del vino, pero cuando está presente en elevada composición se considera el causante de su mal gusto.

3.2 Características

El acetato de etilo es un líquido incoloro no residual, con un olor suave o afrutado característico de los ésteres. Es miscible con hidrocarburos, cetonas, alcoholes y éteres y poco soluble en agua, 8.3 g de acetato por 100 ml de agua, pudiendo aumentar la solubilidad con la temperatura. Se trata de un disolvente moderadamente polar que es volátil, no tóxico (a no ser que se presente en elevada concentración) y no higroscópico. Por su disposición molecular, es un aceptor débil de puentes de hidrógeno y no es donador debido a la ausencia de un protón ácido (un átomo hidrógeno enlazado de manera directa a un átomo electronegativo como O, N o F).

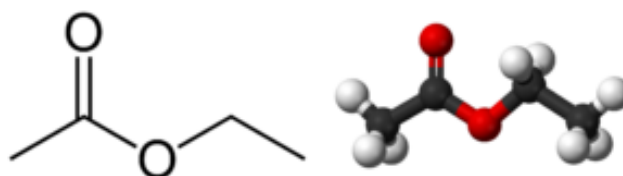


Figura 1: Configuración molecular del acetato de etilo

Es un producto altamente inflamable, por lo que no se debe manipular o almacenar cerca de llamas abiertas, calor o chispas, y requiere ventilación adecuada. No se debe tampoco almacenar o mezclar con oxidantes fuertes, como cloro líquido y oxígeno concentrado. Es irritante de la piel y de las vías respiratorias. Sin embargo, se trata del disolvente orgánico de uso industrial menos tóxico; de hecho, no ha habido casos de intoxicación humana por ingestión oral ni se han registrado efectos secundarios crónicos que pudiesen ser asignados al acetato de etilo. No es un compuesto corrosivo

y de hecho puede ser almacenado en acero al carbono sin recubrimientos especiales (2).

3.3 Propiedades

En las siguientes tablas se adjuntan las principales propiedades físicas, químicas y termodinámicas del acetato de etilo, que son muy importantes a la hora de tomar las decisiones más coherentes para el diseño de la planta de producción.

3.3.1 Propiedades físicas

En la tabla 1 se recogen las principales propiedades físicas del acetato de etilo.

Tabla 1: Propiedades físicas del acetato de etilo (2,3)

Propiedad física	Valor
Peso molecular (g/mol)	88.052
Punto ebullición (°C)	77
Punto fusión (°C)	-83.60
Densidad del líquido (kg/m ³)	902
Densidad relativa del vapor (Aire=1)	3.04
Índice de refracción (n _D ²⁰)	1.37
Viscosidad cinemática a 20°C (kg/m s)	0.0004
Tensión superficial a 20°C (N/m)	0.024
Temperatura crítica (°C)	250
Presión crítica (bar)	0.0385
Presión vapor (bar)	0.124
Acidez (pKa)	25
Momento dipolar (D)	1.78

El hecho de ser soluble en disolventes orgánicos no es un impedimento para que el acetato de etilo forme azeótropos secundarios con este tipo de compuestos. En la tabla 2 se recoge este comportamiento a presión atmosférica (2).

Tabla 2: Azeótropos del acetato de etilo a P=1 atm

Otro compuesto	Punto de ebullición (°C)	Composición AE (%wt)
Agua	70.4	93.9
Metanol	62.3	56
Etanol	71.8	69.2
Isopropanol	75.3	75
Disulfuro de carbono	46.0	7.3
Ioduro de etilo	70.4	24
Ciclohexano	72.8	46
Hexano	65.0	58
Sulfuro de etilo	73.0	77
1,3-ciclohexadieno	72.8	46

Además, también forma un azeótropo ternario con etanol y agua, con un punto de ebullición de 70.3 °C, siendo su composición (% wt) 83.2 acetato de etilo, 7.8 agua y 9.0 etanol como se puede comprobar en el diagrama ternario presentado en la figura 2:

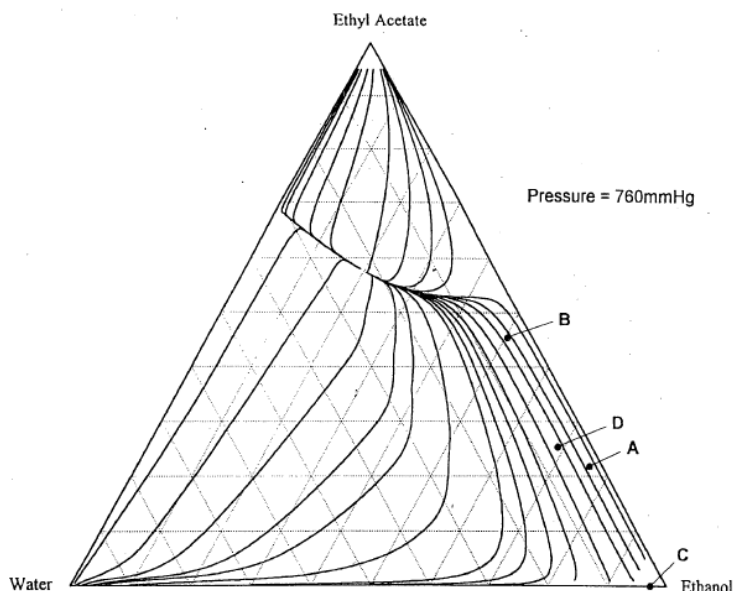


Figura 2: Diagrama ternario acetato de etilo - agua – etanol (8)

3.3.2 Propiedades químicas: la reactividad de los ésteres

Debido a las características inherentes del acetato de etilo su comportamiento químico se ve regido por la química de los ésteres; debido a las múltiples combinaciones de ácido y alcohol las propiedades de estos compuestos pueden variar de manera considerable. A continuación se recogen reacciones típicas aplicables a la mayoría de los ésteres (4).

3.3.2.1 Hidrólisis

Los ésteres se dividen en el ácido y el alcohol originales bajo la acción de la humedad. Esta hidrólisis es catalizada tanto por ácidos (protones) como por bases (iones hidroxilo), siendo el efecto catalítico de estas últimas superior por lo que industrialmente esta reacción se lleva a cabo en medio alcalino. Sin embargo, la hidrólisis ácida es recomendable para la producción de ácidos puros.

La hidrólisis de ésteres empleando agua y un ácido mineral conduce a una disolución en la que conviven en equilibrio el éster, el alcohol y el ácido carboxílico libre. Para aislar el ácido puro (y por lo tanto que se complete la reacción de hidrólisis) es necesario retirar el alcohol del ecosistema reactivo. La velocidad de reacción es muy baja debido a la baja solubilidad del éster en agua. Por ello, desde un punto de vista práctico se suelen añadir compuestos aromáticos con azufre (como el reactivo Twitchell) desarrollando la reacción a temperaturas elevadas y bajo presión. Si se emplea una base la sal del ácido carboxílico se forma, generando una reacción de

saponificación; si se retira el ácido del sistema en equilibrio la reacción se vuelve irreversible.

También es factible una hidrólisis enzimática empleando enzimas lipolíticas específicas (esterasas), que rompen los enlaces moleculares para dar una molécula de alcohol y una de ácido, a una temperatura inferior a 40 °C. Esto es lo que ocurre por ejemplo en el interior del organismo humano: las lipasas, unas enzimas alojadas en el páncreas, catalizan la ruptura de las grasas en ácidos grasos y glicerol. Estas enzimas son particularmente efectivas en un rango de pH dominado por ácidos débiles.

3.3.2.2 Transesterificación

Cuando los ésteres se calientan con alcoholes, ácidos u otros ésteres, el grupo alcohol o el grupo ácido se pueden intercambiar prácticamente por completo en un proceso que recibe el nombre de transesterificación, que se ve catalizado por la presencia de ácidos o bases.

Lógicamente esta reacción puede oscilar en torno a tres vertientes diferentes: intercambio del grupo alcohol (alcohólisis), intercambio del grupo ácido (acidólisis, por ejemplo, la reacción del acetato de polivinilo con ácido butírico para dar butiral de polivinilo) e intercambio éster-éster; todas son reacciones en las que gobierna el equilibrio termodinámico y que se pueden llegar a convertir en irreversibles si algún componente se va retirando de la mezcla de reacción.

El catalizador más empleado para llevar a cabo la reacción de transesterificación es sodio en forma dispersa (pulverizado de manera fina); también se han utilizado de manera habitual sales de estaño o compuestos de magnesio a nivel industrial, ya que esta reacción juega un papel muy importante a gran escala y es importante también a nivel de laboratorio y desde el enfoque de la química analítica.

Este tipo de reactividad posibilita la reducción del punto de ebullición de los ésteres al sustituir cadenas largas de alcohol por cadenas cortas (por ejemplo, metanol) y facilita el trabajo si la esterificación directa con el alcohol deseado es muy difícil de alcanzar debido a razones físicas (alto punto de ebullición, baja solubilidad o elevada viscosidad); este último aspecto se trabaja mucho en la industria de los polímeros: el polietileno de tereftalato (PET) se produce por la transesterificación del dimetil-tereftalato con etilenglicol, empleando sales de calcio y antimonio como catalizadores.

3.3.2.3 Amonólisis

El amoníaco y los ésteres reaccionan para formar alcoholes y amidas. Esta reacción es muy similar a la de hidrólisis, y se lleva a cabo en amoníaco en fase acuosa o alcohólica. Ésteres pequeños proporcionan buenos rendimientos incluso a temperatura ambiente, mientras que los ésteres de mayor tamaño molecular requieren de mayores temperaturas y presión. Si se emplean aminas primarias o secundarias, se forman las amidas N-sustituidas; las hidracinas dan lugar a las correspondientes hidracidas.

Si los ésteres se ponen en contacto con amoníaco sobre un catalizador de alúmina a elevadas temperaturas (400-500 °C), se produce de manera prácticamente simultánea la deshidratación de las amidas intermediarias y los correspondientes nitrilos se obtienen de manera directa.

3.3.2.4 Reducción

Bajo ciertas condiciones los ésteres se pueden reducir a alcoholes. Una reacción clásica de este estilo es la Reducción de Bouveault-Blanc, desarrollada en 1904, que actualmente solo se emplea para tareas de laboratorio dado que ha sido sustituida por completo por la hidrogenación catalítica. La ventaja de esta reacción de Bouveault-Blanc es que únicamente el grupo éster se hidrogena, mientras que los enlaces dobles carbono-carbono no se ven reducidos a enlaces simples; así es útil para la síntesis de alcoholes insaturados a partir de ésteres insaturados.

En la actualidad, la reacción de reducción más comúnmente empleada es la hidrogenación a 200-300 °C y presiones oscilantes entre los 100 y los 300 bar en la presencia de catalizadores de cromito de cobre. Hay que tener presente que los compuestos de azufre y los halógenos son venenos para este catalizador. Este método proporciona grandes rendimientos y se emplea para la reducción a gran escala de ácidos grasos obtenidos mediante fenómenos de transesterificación (por ejemplo, el aceite de coco).

Esta reducción también se puede conseguir mediante la reacción de Grignard, donde los ésteres reaccionan con los compuestos halogenados de magnesio (organometálico); los ésteres procedentes del ácido metanoico dan alcoholes secundarios, mientras que los otros ésteres proporcionan alcoholes terciarios. Los rendimientos son elevados (aproximadamente del 95%), pero su uso actual se ciñe a escala de laboratorio. Si se desean conseguir alcoholes de muy elevada pureza, se puede recurrir a la reducción empleando hidruros metálicos (especialmente hidruro de litio y aluminio).

3.3.2.5 Condensación de Claisen

La reacción de los ésteres con grupos metilo en presencia de compuestos alcalinos (uno de los dos compuestos ha de ser enolizable), por ejemplo, el alcóxido de sodio, da lugar a la formación de β -cetoéster. El ejemplo clásico es la condensación de dos moléculas de acetato de etilo para dar acetoacetato. Este β -cetoéster (ésteres de ácidos oxocarboxílicos) se encuentra entre los compuestos intermedios más importantes tanto en el laboratorio como en la industria.

Durante la hidrólisis con bases diluidas, estos ésteres se descomponen para dar cetonas, alcoholes y dióxido de carbono; prácticamente cualquier cetona puede ser sintetizada empleando este mecanismo de condensación. No obstante, en la industria la condensación de Claisen ha sido sustituida por la síntesis del acetoacetato (ácido acetoacético) a partir de los compuestos con dos grupos cetona.

3.3.2.6 Pirólisis

Esta reactividad se produce cuando se alcanzan temperaturas superiores a los 400 °C sobre un agente inerte en tanto a la transmisión de calor, como puede ser el cuarzo, los ésteres se descomponen en el ácido carboxílico correspondiente y en el compuesto insaturado que corresponde al alcohol. Los ésteres de alcoholes primarios con frecuencia conducen a α -olefinas, y el doble enlace no *vía*ja a lo largo de la cadena carbonatada. Hay que tener en cuenta que los ésteres de metilo y otros ésteres sin átomos de hidrógeno en la posición β no dan productos de pirolisis uniforme.

Cuando el compuesto se calienta a elevadas temperaturas en presencia de óxidos metálicos como el óxido de torio o de calcio, los ésteres dan lugar a cetonas con una rentabilidad muy elevada, con la parte alcohólica descartada como una olefina.

La reactividad química de los ésteres se sintetiza de manera muy gráfica en la figura 3.

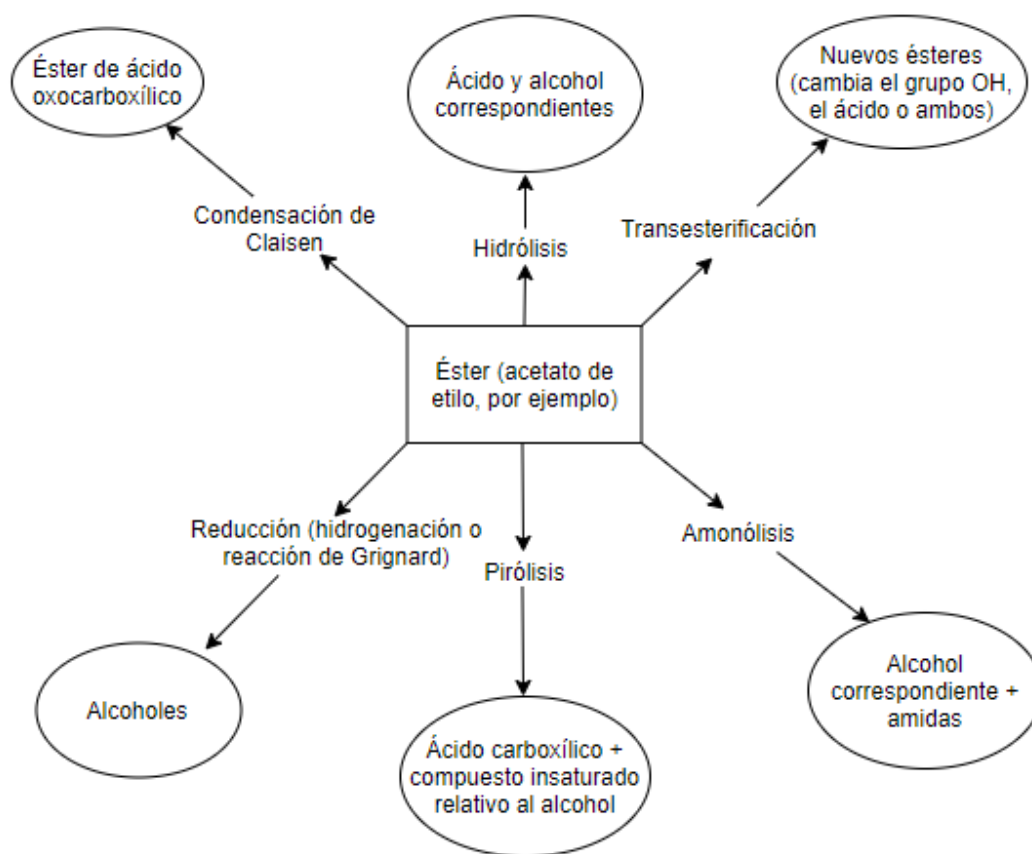


Figura 3: Cuadro de reactividad química de los ésteres (elaboración propia)

3.3.3 Propiedades termodinámicas

Las más destacadas se recogen en la tabla 3.

Tabla 3: Propiedades termodinámicas más importantes (3, Hysys)

Propiedades termodinámicas	Valor
Punto flash (°C)	-4.0
Temperatura de autoignición (°C)	427
Límite de explosividad inferior (%)	2.2
Límite de explosividad superior (%)	11
Calor de combustión (kJ/mol)	2238.1
Calor latente de vap. a 25 °C (kJ/mol)	35.6
Calor específico (kJ/mol °C)	0.17
Entalpía estándar de formación (kJ/mol)	-442.92

3.4 Aplicaciones

Debido a su baja peligrosidad, el acetato de etilo se emplea en la industria química como disolvente universal en múltiples campos. Se puede utilizar para sintetizar productos destinados al recubrimiento superficial, como barnices o lacas basados en nitrocelulosa, ya que tiene una gran solubilidad (como ya se ha indicado anteriormente) en diluyentes aromáticos y alifáticos; como disolvente de compuestos utilizados para revestir y decorar objetos de cerámica, como reactivo para la manufactura de pigmentos, como base para la producción de numerosos compuestos explosivos y es el disolvente de uso más extendido en arte (2).

Sus aplicaciones también se extienden a la industria de los adhesivos y colas derivados de la celulosa, así como para producir compuestos destinados a la remoción de sustancias resinosas en la industria del caucho. Incluso en la industria papelera para recubrir y ornamentar objetos de papel o en la industria gráfica para la obtención de tintas de impresión.

El acetato de etilo también se emplea en la industria textil para la preparación de tejidos de lana para teñido, en la elaboración, revestimiento y decoración de artículos de cuero y con fines de limpieza. Gracias a su baja toxicidad se utiliza tanto en las industrias farmacéutica como en la de los alimentos; algunas de sus aplicaciones en estos campos son la concentración y purificación de antibióticos (actuando como compuesto de trabajo en las etapas de extracción) o la preparación de esencias y sabores sintéticos (hay que recordar que el olor característico de las frutas es debido a la presencia de ésteres) (1).

En el laboratorio, las mezclas que contienen acetato de etilo se utilizan de manera muy habitual en las operaciones de cromatografía y extracciones; debido a que es ligeramente volátil a temperatura ambiente y tiene una temperatura de ebullición de

77 °C se puede retirar muy fácilmente de una muestra poniéndola en un baño maría, proporcionando la ventilación adecuada.

En el campo de la entomología (parte de la zoología que estudia los insectos) se utiliza como un gas asfixiante para el estudio y la colección de los insectos. Si se vierte acetato de etilo en el interior de un tarro, los vapores que emanan matarán a los insectos rápidamente sin erosionar su exoesqueleto; dado que es un compuesto no higroscópico también mantiene al insecto muerto en unas condiciones adecuadas para su posterior exposición en una colección (5). En la figura 4 se propone un diagrama de sectores donde se explicitan las principales aplicaciones del acetato de etilo en el mercado estadounidense.

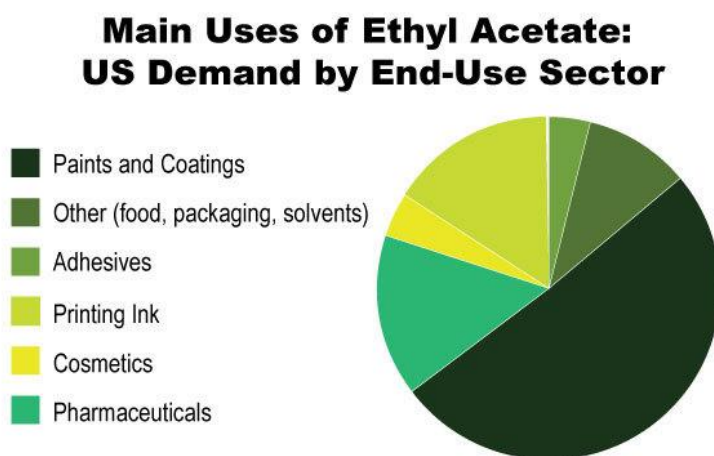


Figura 4: Principales aplicaciones del acetato de etilo en el mercado norteamericano

4. Estudio de mercado

El análisis de mercado se centrará en la información de utilidad para decidir si la planta de producción de acetato de etilo a diseñar en este proyecto es viable desde un punto de vista económico a largo plazo teniendo en cuenta la volatilidad de los mercados. Es importante tener en consideración que el análisis llevado a cabo por expertos en la materia se basa en predicciones sustentadas en el contexto social y económico existente en el momento del estudio.

En los próximos 6-7 años se espera que el mercado de acetato de etilo crezca de manera significativa por su condición de disolvente universal poco tóxico con olor agradable; debido a estas características los campos de uso son muy amplios y esta predicción de crecimiento de capacidad de producción se cimenta en los siguientes puntos (6, 7):

- El acetato de etilo se emplea con mucha frecuencia como disolvente para productos destinados a la manicura, bien sean esmaltes de uñas o quitaesmaltes, debido a su baja toxicidad y olor agradable. En los esmaltes de uñas actúa como agente formador de la película superficial, siendo fácilmente retirable. El aumento en la demanda de estos productos para uñas debido a la creciente conciencia sobre la imagen personal, principalmente en las nuevas generaciones, puede impulsar la demanda de productos en aplicaciones para el cuidado de uñas. Esta tendencia también está provocando el crecimiento del sector del cuidado personal que está provocando la apertura de muchos centros de belleza en todo el mundo, aumentando de manera lógica la demanda de este tipo de productos.
- El acetato de etilo se usa con gran frecuencia en el mundo de la química analítica como fase para llevar a cabo procesos cromatográficos. En el año 2016, el mercado cromatográfico global fue valorado en 7050 millones de dólares americanos (USD). Debido a su estructura molecular posee más de cuatro polaridades, de ahí que su uso sea extendido para llevar a cabo separaciones difíciles. Estas columnas cromatográficas se suelen emplear en la industria enológica para realizar estudios acerca de las diferentes tipologías de vino que se ofertan al mercado; el crecimiento en el consumo de vino por parte de la población, principalmente en países europeos como Alemania y el Reino Unido, puede favorecer el crecimiento del mercado de acetato de etilo.
- El consumo mundial de café continúa en expansión, siendo liderado por Estados Unidos y Europa. Una amplia gama de sabores, clases y tipos de preparación junto con un aumento en sus salidas han impulsado la demanda del producto; este crecimiento está estrechamente relacionado con la pérdida de popularidad de los refrescos en la población de 18-25 años y con el incremento de la conciencia de salud del consumidor más adulto, siendo consciente de los efectos negativos de los refrescos carbonatados. El aumento

en el gasto en bebidas recreativas junto con el crecimiento en los ingresos disponibles ha estimulado la demanda de productos, lo que puede tener una influencia positiva en el mercado del acetato de etilo, ya que se utiliza como agente de masa para llevar a cabo la extracción de las hojas de la planta del café con el fin de disminuir su contenido en cafeína (proceso de descafeinado).

- El aumento del nivel de vida ha llevado a una creciente demanda de perfumes en la población joven, promoviendo así el despegue de la industria; el acetato de etilo encuentra también hueco en este mercado debido a su rápida evaporación de la piel dejando una fragancia agradable.
- Las políticas restrictivas aplicables a la obtención de cuero natural junto con una concienciación colectiva cada vez mayor sobre el bienestar animal han dirigido el sector hacia la producción cada vez mayor de cuero artificial/sintético, cuyos tratamientos superficiales se suelen realizar con disolventes poco agresivos como el acetato de etilo. El crecimiento en la disponibilidad de accesorios de este tipo (chupas, carteras, mochilas, cinturones...) además de una tendencia elegante cada vez mayor en el sector de la automoción (cubiertas de asientos, volantes...) junto con la expedición de regulaciones de importación auténticas ha impulsado el despunte de la industria, que se espera que supere los 95000 millones \$ para el año 2024.

Hoy en día, la mayoría de los complejos de producción de acetato de etilo se localizan en la región de Asia-Pacífico, que también es la región de mayor consumo del producto en todo el mundo. En el año 2013 los principales países productores de acetato de etilo fueron China, India, Reino Unido, Japón y Brasil (a partir de bioetanol). La producción de este compuesto ha superado los 3.5 millones de toneladas en el año 2015 (8); su consumo por zonas geográficas se muestra en la figura 5.

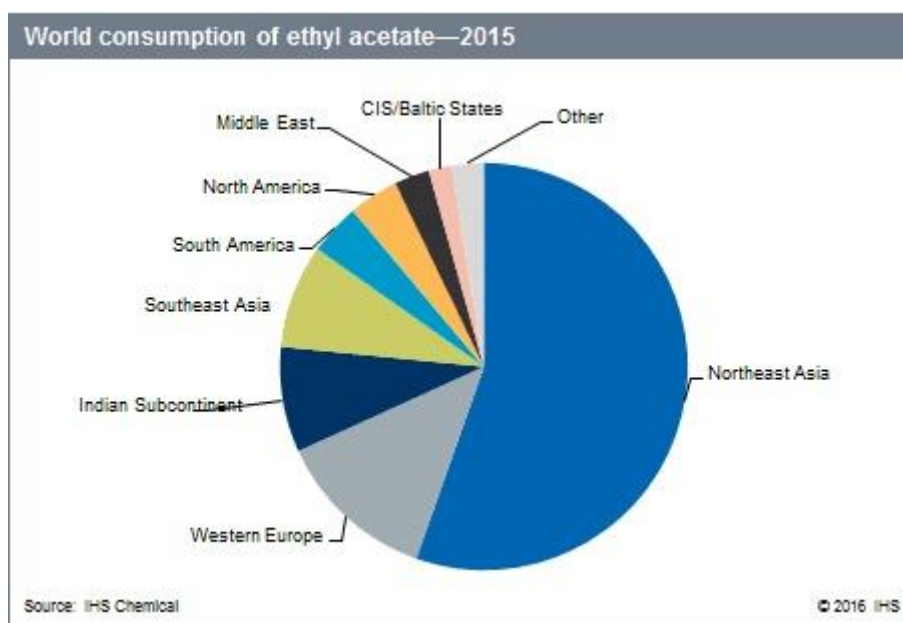


Figura 5: Consumo mundial acetato de etilo en el año 2015 por regiones (7)

Con la información destacada hasta el momento en este estudio de mercado, resulta obvio ver que la demanda de acetato de etilo depende en gran medida de las condiciones económicas generales que rigen el movimiento de los mercados. Por ejemplo, el recubrimiento de superficies depende enormemente de la actividad de construcción y reformas, del sector del automóvil y de la fabricación de equipos originales; en el sector de las tintas la demanda de acetatos tiende a ser más resistente a la recesión ya que la mayor parte del rotograbado y de las tintas flexográficas se destina al empaquetado en el sector de la alimentación.

Se espera que China continúe siendo el mayor consumidor de acetato de etilo en el mundo, con un fuerte crecimiento estimado del 4.6% para el periodo 2015-2020, liderado por el uso del producto en aplicaciones de recubrimiento superficial, seguido por el crecimiento del sector de las tintas de impresión. Los sectores europeo y estadounidense representan mercados más pequeños, asentados y maduros que el chino, con un crecimiento estimado más estable del 1.4% y 2% respectivamente, asentado en las condiciones económicas favorables que se ciernen en el futuro. Es importante tener en cuenta uno de los mercados con mayor volumen de facturación, como es el indio, a la hora de realizar el análisis de mercado. La demanda de los acetatos en este país se espera que crezca en el periodo 2015-2020 debido a un aumento en el consumo doméstico y a las exportaciones masivas (7).

Considerando todos estos aspectos, se estima que el mercado del acetato de etilo tenga una tasa anual de crecimiento del 3% a lo largo de los próximos años. Estas predicciones, realizadas en el año 2015, son bastante acertadas como demuestra la expansión de una de las plantas de producción más importantes de Europa a finales del año 2017; un incremento de capacidad de 100 000 toneladas/año se ha realizado en la planta de INEOS que opera en Hull (Reino Unido) con el fin de poder dar respuesta a la demanda creciente de los mercados internacionales (9).

En tanto a la evolución de los precios del producto se puede decir que sigue el patrón de la Ley de la Oferta y la Demanda; a mediados del año 2017 tres de las grandes empresas productoras a nivel mundial (Sasol Chemicals NA, Eastman Chemical US y Celanese Corporation) incrementaron el precio del acetato de etilo en 8 centavos por libra producida, lo cual refleja un mercado global muy ajustado. Con esta subida de precios el producto ascendió hasta 60 cent/lb, recuperando los valores alcanzados antes de la fuerte recesión económica global de finales de la década pasada que afectó gravemente a los mercados. La demanda a finales del año 2017 alcanzó prácticamente máximos históricos debido a la intención de Celanese Corporation de aumentar los precios del acetato de etilo en 150 €/tonelada a partir del 1 de enero (10).

5. Análisis de alternativas de producción

Existen numerosas formas para producir de manera industrial acetato de etilo; algunas se emplean para producir todo el rango de ésteres y otras se usan para producir ésteres individuales. Por ejemplo, la alternativa más empleada a nivel comercial es la basada en la ruta de reacción delineada por la esterificación de Fischer, que se emplea para producir todos los ésteres desde un punto de vista industrial. El esquema de reacción en el que se basa fue descubierto por Emil Fischer a finales del siglo XIX, siendo un claro ejemplo de sustitución nucleofílica acílica basada en la electrofilicidad del carbono del grupo carbonilo y la nucleofilicidad del alcohol (11).

5.1 Esterificación de Fischer

En el proceso de esterificación, el etanol y el ácido acético se mezclan junto a la corriente de reciclaje de acetato de etilo crudo en un sistema de destilación reactiva, por lo que el recipiente destinado a cumplir como reactor actúa también como una columna de destilación azeotrópica. Esta reacción de esterificación produce agua como subproducto (como se puede constatar en la expresión estequiométrica que rige los fenómenos químicos), siendo esta una rémora para la reacción (en términos de limitación de equilibrio termodinámico) por lo que se recurre a su eliminación en la columna de reacción tan pronto se va generando.

El producto condensado de cabezas se almacena en un decantador donde por un proceso de separación física (diferencia de densidades) se separa en dos fases: la fase más ligera -orgánica- se recicla parcialmente a la columna de reacción y la corriente mezclada se alimenta a una segunda torre de destilación, donde el producto de colas es una corriente cruda de acetato de etilo y el producto de cabezas es un azeótropo ternario de acetato de etilo, etanol y agua, que se recoge en un segundo decantador donde se divide en dos fases siguiendo el mismo procedimiento de separación física: tras este fenómeno, la fase orgánica se recicla a esta 2ª columna mientras que la fase acuosa se combina con la fase acuosa de la 1ª columna para ser alimentada a una tercera columna de destilación, donde por cabezas se obtiene el azeótropo ternario (que se recicla a la columna de reacción) y por colas una corriente de residuo (12).

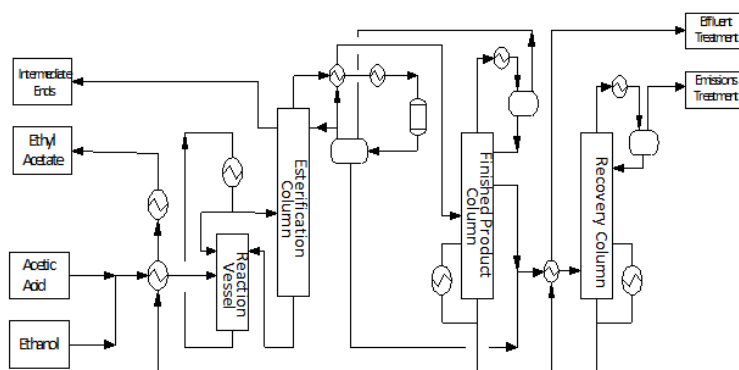


Figura 6: BFD para el proceso de producción de acetato de etilo basado en una esterificación

Puesto que la reacción de esterificación es una reacción reversible limitada por la termodinámica, la conversión por paso está teóricamente estipulada por la Ley de la Acción de las Masas a través de la constante de equilibrio basada en la relación entre las concentraciones molares de productos y reactivos; por ello, con el fin de solventar esta problemática es necesario utilizar muchas columnas de destilación azeotrópicas, con el gasto energético que ello conlleva, además de problemas a la hora de establecer la estrategia de control de la planta. Asimismo, utilizar etanol procedente de instalaciones petroquímicas (con cierta cantidad de agua) limita el nivel de conversión de la reacción de esterificación por lo que para que sea viable desde un punto de vista económico es necesario utilizar etanol con bajo contenido en agua, que comercialmente es bastante caro (12).

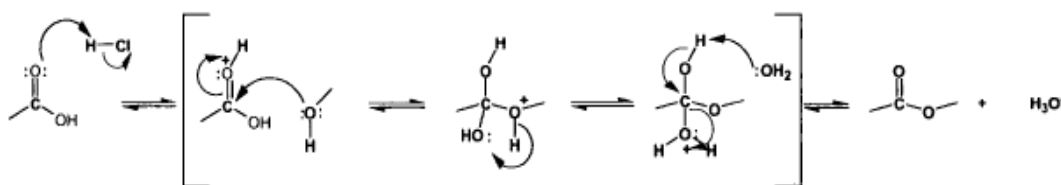


Figura 7: Mecanismo de la reacción de esterificación (13)

Sumado a todo esto, hay que tener en cuenta el uso de más de un reactivo (*feedstock*) con lo que lógicamente se van a incrementar los costes asociados a la operación y mantenimiento de la planta; además, el ácido acético es un ácido con propiedades altamente corrosivas, por lo que será necesario utilizar algún tipo de material ingenieril con propiedades especiales, por ejemplo acero inoxidable, cuyo precio de mercado es mucho más alto que el del acero al carbono o que el de los aceros de baja aleación, de utilización mucho más común en la industria.

5.2 Reacción de Tishchenko a partir de dos moléculas de acetaldehído

La reacción de dismutación de dos moléculas de acetaldehído para formar acetato de etilo sigue la ruta de reacción descubierta y estudiada por Tishchenko. La reacción se ve catalizada por alcóxidos de aluminio y activada por cloruros de aluminio o hierro. A pesar de que utilice un único compuesto no corrosivo como reactivo, no se considera un proceso respetuoso con el medio ambiente debido a la gran dificultad de trabajar con el acetaldehído, un compuesto tóxico.

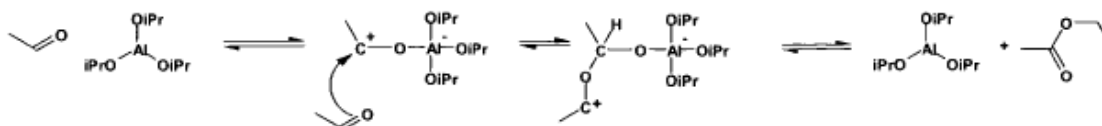


Figura 8: Mecanismo de la reacción de la dismutación de Tishchenko (13)

A esto hay que sumar la dificultad provocada por la producción de agua, que debe ser retirada continuamente durante la reacción puesto que su presencia puede favorecer el desplazamiento del equilibrio hacia la formación de ácido acético en vez de hacia el

producto deseado. En estas circunstancias y teniendo estos aspectos en consideración, es una alternativa prácticamente en desuso en la actualidad. Por otra parte, esta reacción de dismutación es altamente exotérmica y el reactor requiere de un potente sistema de enfriamiento, con el coste económico que ello conlleva.

Por todos estos motivos se descarta automáticamente la utilización de esta alternativa para la producción industrial de acetato de etilo, mismo sin entrar en consideraciones relativas al propio proceso, ya que teniendo en cuenta los aspectos relativos exclusivamente a la reacción se dispone de una cantidad de información suficiente como para descartar esta alternativa de obtención.

5.3 Proceso Wacker-Hoechst + Reacción de Tishchenko

Los problemas de seguridad y salud derivados del manejo de grandes cantidades de acetaldehído son salvados siguiendo esta alternativa, que consta de dos fases claramente diferenciadas. El reactivo es etileno que se oxida, en presencia de catalizadores de cloruro de paladio, a acetaldehído siguiendo el proceso Wacker-Hoechst (14); esta reacción química fue el primer caso de catálisis homogénea a escala industrial con química basada en compuestos de organopaladio (compuesto orgánico que contiene átomos de carbono y de paladio unidos por enlace químico). Hoy en día es la principal vía de obtención a nivel industrial de acetaldehído y se puede acometer siguiendo dos estrategias diferentes: el proceso en una única etapa o el proceso basado en dos etapas (15).

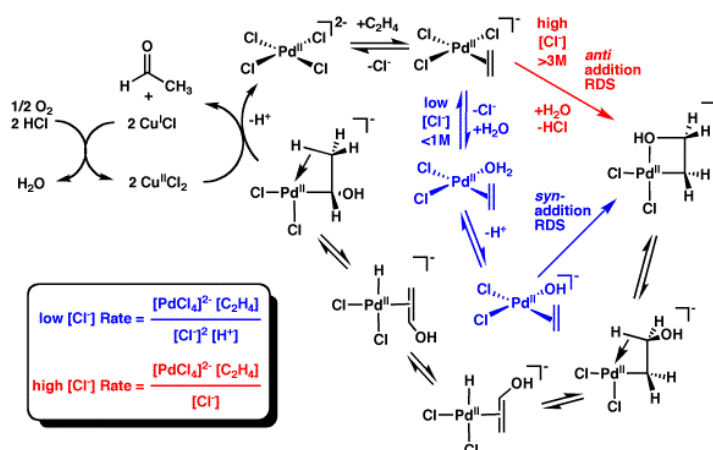


Figura 9: Mecanismo de reacción del Proceso Wacker (14)

En la reacción de oxidación en una etapa, la reacción de formación de acetaldehído y la regeneración del catalizador tienen lugar en el mismo reactor y se emplea oxígeno como agente oxidante. El etileno fresco de la alimentación en fase gas, el oxígeno y una corriente de gas recirculado se alimentan continuamente al reactor, que contiene una solución acuosa de cloruros (de paladio y de cobre). El reactor opera a 120-130°C y 3 atm de presión. La corriente de salida del reactor se alimenta a un separador líquido/gas que opera cerca de la presión atmosférica.

La corriente de líquido que sale del separador se divide en dos corrientes; una es recirculada al reactor y otra es conducida a un regenerador, donde se mezcla con oxígeno y se calienta con vapor de agua a 170°C para descomponer el oxalato de cobre y otros compuestos orgánicos formados (y no deseados) y se recircula al reactor. La corriente de gas que sale del separador que contiene al acetaldehído es enviada a una columna de absorción, donde se enfría y se lava con agua para condensar el acetaldehído y otros compuestos condensables.

Los gases no condensables que consisten en el etileno que no ha reaccionado, oxígeno e inertes se escapan por la cabeza del absorbedor. Una parte de esta corriente se purga hacia incineración para controlar la acumulación de inertes en el sistema y la restante se recircula al reactor. La corriente condensada, que contiene alrededor del 10% de acetaldehído en peso, se divide en dos corrientes: una que se recircula al lavador y otra que se calienta antes de ser alimentada a una torre de destilación, donde las sustancias con bajo punto de ebullición (alquillos clorados, principalmente) se eliminan por cabezas.

El flujo de colas alimenta la columna de recuperación de producto, donde se separa el acetaldehído como destilado por cabezas; además, surge una corriente de cronotaldehído como corriente lateral en la mitad de la columna que debe ser enviada a tratamiento de aguas residuales. Esta torre de purificación/recuperación trabaja a presión atmosférica y debido al bajo punto de ebullición del acetaldehído, hay que trabajar con agua refrigerada (elevado precio) en la cabeza del condensador. Otro incremento de precio viene por el hecho de tener que trabajar con gas inerte en la corriente de reflujo para minimizar el riesgo de entrada de aire, que no puede entrar en contacto con el acetaldehído. Para evitar un aumento de gas inerte, es necesario trabajar con oxígeno y etileno puros, con lo cual se incrementa el coste de operación.

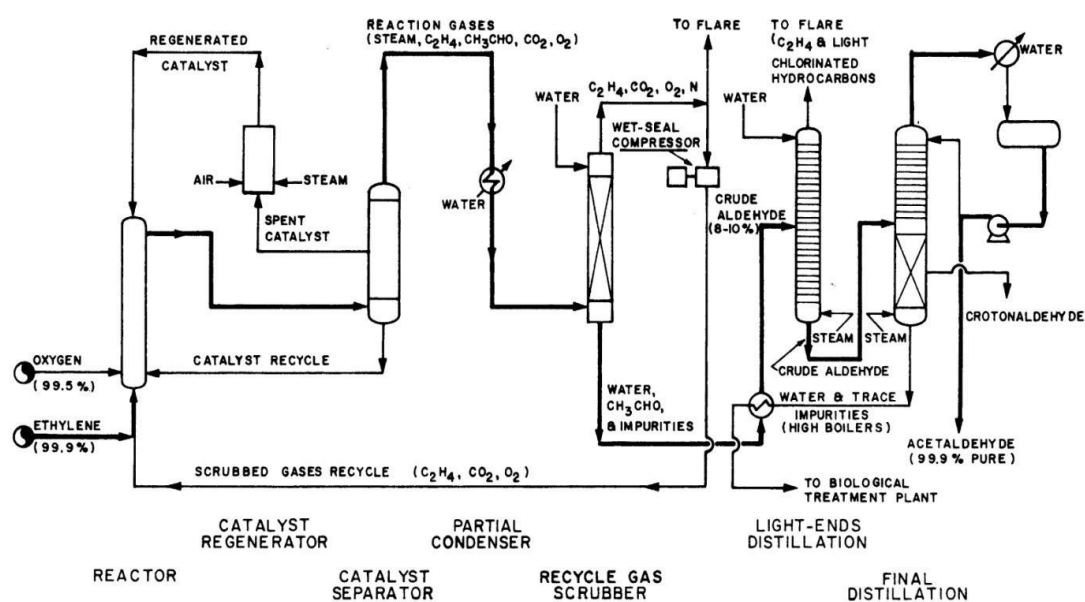


Figura 10: PFD para el Proceso Wacker-Hoechst en una sola etapa (15)

En el proceso multietapa, la reacción de formación de acetaldehído y la regeneración del catalizador tienen lugar en reactores separados y en este caso el agente oxidante empleado es aire. El etileno se alimenta de manera continua a un reactor tubular de flujo en pistón en el cual se mezcla con la solución catalítica acuosa de cloruros, a una temperatura de 110°C y 9-10 atm. La conversión del etileno es total a la salida del reactor.

La corriente de salida del reactor se somete a una destilación flash a presión atmosférica de modo que se produce la evaporación del agua y acetaldehído. La corriente de cabezas del flash se lleva a una columna de acetaldehído donde se separa el agua de una disolución de acetaldehído más concentrada, que se recircula a la sección de scrubbers y a la columna flash (para mantener constante la concentración de catalizador). La corriente líquida que sale del flash (el entramado catalítico) se envía al segundo reactor, también tubular, en el cual se produce la oxidación de las sales de cobre empleando aire como agente oxidante. La solución de sales "reoxidadas" entra a un separador de fases en la cual se separan en la fase gaseosa el O₂ no reaccionado, inertes y algunos compuestos orgánicos. Esta corriente gaseosa se somete a un scrubbing para recuperar el acetaldehído que pudiese contener y una vez limpia se puede emplear como inerte puesto que es prácticamente N₂ con trazas.

Por otra parte, la disolución de sales líquida que sale del separador se divide en dos corrientes: una de ellas se recicla al reactor directamente y la segunda se somete a un tratamiento térmico a elevada temperatura (200°C) para descomponer el oxalato de cobre y otros compuestos volátiles no deseados. La corriente que sale del regenerador se introduce directamente en el flash. La disolución de acetaldehído más concentrada se introduce en una torre de destilación de ligeros: por cabezas salen las sustancias con bajo punto de ebullición (clorometano, cloroetano...) mientras que por colas sale un flujo que se dirige a una nueva torre para purificar el acetaldehído por cabezas, derivados halogenados del acetaldehído por una salida lateral y un agua residual por el fondo de la columna (compuesto principalmente por ácido acético y agua).

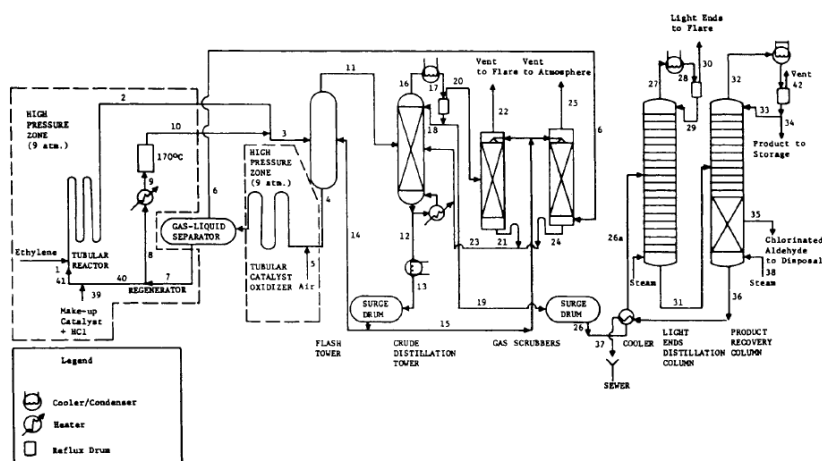


Figura 11: PFD para el Proceso Wacker-Hoechst en dos etapas (15)

Una vez obtenido el acetaldehído, es necesario construir el entramado catalítico para posibilitar la reacción de dimerización del mismo: una disolución de etóxido de aluminio se prepara al disolver aluminio granular sólido en una mezcla de etanol y acetato de etilo en presencia de cloruro de aluminio y una pequeña cantidad de cloruro de zinc. La reacción produce hidrógeno gas y es altamente exotérmica, requiriendo por ello de enfriamiento intensivo para evitar la pérdida de materia orgánica. La disolución final contiene aproximadamente un 2% en aluminio.

El siguiente paso en el proceso consiste en introducir la disolución catalítica (se observa por lo tanto que se trata de un proceso de catálisis homogénea) junto al acetaldehído obtenido anteriormente en el reactor, donde la reacción es muy sensible a cambios en la temperatura y en la cantidad de catalizador, por lo que estos parámetros se ajustan para obtener una conversión del 98% del acetaldehído por paso, pudiendo llegar hasta el 99.5% si se utilizan posteriormente depósitos de agitado donde el producto se aísla de los compuestos residuales. Las condiciones óptimas para la operación a nivel industrial son una temperatura de reacción de 0°C, por lo que el reactor ha de incluir alguna forma de enfriamiento extremo, como por ejemplo un serpentín por el que circule un freón o líquido refrigerante (habitualmente se opta por una salmuera refrigerada, *chilled brine*) y un tiempo de residencia de 1 hora, lo cual encarece catedraliciamente los costes asociados a operación.

Los compuestos que pueden separados por operaciones de destilación se eliminan en un recipiente de separación de residuos por evaporación (similar a un depósito flash), para tratarlos posteriormente con agua para reconvertir estos compuestos a etanol; el resto de componentes químicos se llevan a tratamiento de residuos, bien sea una planta de degradación biológica o a un tren de incineración. Los productos que interesan, una vez aislados de los residuos, se dirigen hacia un tren de columnas de destilación para obtener acetato de etilo, el producto, y acetaldehído, el reactivo que no ha reaccionado con el fin de su recirculación para la reacción de Tishchenko, además de una corriente de ligeros que puede ser utilizada para su combustión y así destinar su aprovechamiento a la obtención de utilidades, un azeótropo etanol-acetato de etilo que se emplea en la etapa de preparación del catalizador y un subproducto, dietil acetal acetaldehído, que puede ser destinado a la venta comercial o hidrolizado para la recuperación de acetaldehído y etanol.

Se puede observar por lo tanto que este proceso combinado para la obtención industrial de acetato de etilo es poco factible en tanto a que se requiere de dos procesos claramente diferenciados para su obtención, lo que implica doblar los costes de inversión, operación y mantenimiento con respecto a una operación basada en un único proceso. Además, las condiciones de operación para llevar a cabo las reacciones químicas son extremas, requiriendo freones para las labores de enfriamiento con el fin de compensar el fuerte carácter exotérmico de las mismas. Sumado al proceso Wacker-Hoechst y al basado en la reacción de Tishchenko hay que considerar además

todo el equipamiento y sistemas de control destinados a la obtención de un entramado catalítico que no se puede conseguir de forma comercial y que por tanto hay que obtener mediante una serie de operaciones fisicoquímicas, que parte de reactivos muy caros y peligrosos de manejar en una planta de proceso.

5.4 Oxidación de etanol

Durante la reacción, el ácido acético formado por la oxidación del etanol se mezcla con el etanol líquido en exceso dando lugar a la esterificación de Fischer que deviene en la obtención de acetato de etilo. La corriente que sale del reactor se separa a través de destilaciones azeotrópicas en tres columnas diferentes para así purificar el acetato de etilo y separarlo del acetaldehído y del etanol, que será recirculado. Por tanto, el proceso constaría de dos etapas enlazadas: la primera que consistiría en la oxidación parcial del etanol para dar lugar a ácido acético y la segunda sería la esterificación del ácido acético formado con el etanol líquido que se alimenta en exceso.

La primera etapa de oxidación se suele realizar en un catalizador de óxido metálico (paladio, por ejemplo) alojado en un soporte hidrofóbico de carbono. No obstante, la selectividad en esta reacción deseada no es del 100% y se producen un gran número de reacciones secundarias que derivan en la formación de cantidades excesivas de CO_2 y otras impurezas. Se ha descubierto que en la selectividad en este reactor los parámetros más sensibles son la elección del metal que constituye el catalizador y el modo de operación. Hay que valorar asimismo que el contenido en ácido acético en este primer reactor es elevado, lo que puede llegar a causar una lixiviación (extracción sólido-líquido) del catalizador metálico, además de provocar problemas de corrosión en el material ingenieril empleado para construir el equipamiento.

Por otro lado, la fase de esterificación se suele realizar en una resina de intercambio catiónico (*Amberlyst 15*, por ejemplo). La elección de un catalizador único es un paso clave para la viabilidad operacional de esta alternativa; numerosos estudios han sido realizados y los mejores resultados han sido obtenidos por Jörgensen et al, que emplearon catalizadores de oro, consiguiendo sintetizar ácido acético y también acetato de etilo, con una gran actividad sobre el etanol inicial. Sin embargo, la selectividad es elevada en ácido acético (otros subproductos son acetaldehído y dióxido de carbono) y este entramado catalítico debe ser mejorado atendiendo a una mayor selectividad en acetato de etilo de tal modo que el proceso sea viable tanto técnicamente como económicamente a escala industrial (16).

Además, al igual que en la alternativa discutida anteriormente, el principal inconveniente deriva de la necesidad de llevar a cabo la reacción en dos pasos diferentes que lógicamente incrementan el coste total del proceso. Una solución para evitar esta dificultad ha sido patentada por Yan et al., basada en el empleo de catalizadores de paladio empleando soportes de zeolita ácida Y, tal y como se recoge en la figura 12. No obstante, numerosos estudios han de ser realizados todavía para

que esta alternativa se implante a gran escala por lo que hoy en día aún no se dispone de la tecnología necesaria.

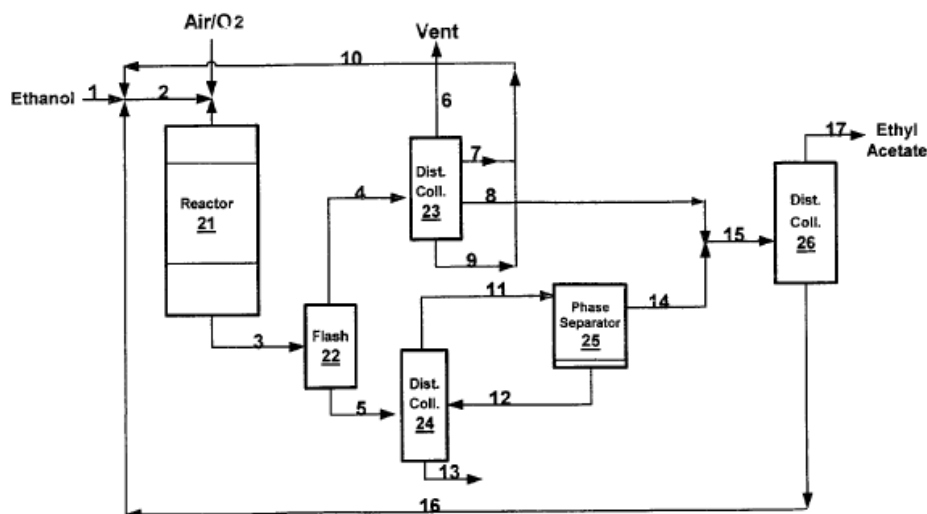


Figura 12: Diagrama de bloques propuesto para la oxidación de etanol (12)

5.5 Alquilación de ácido acético con etileno

Es bien conocido que las olefinas reaccionan con ácidos carboxílicos alifáticos para formar los ésteres correspondientes. Para el caso de la producción de acetato de etilo, el etileno y el ácido acético reaccionan siguiendo un fenómeno de catálisis homogénea en donde se emplea un heteropoliácido (ácido poliprótico con más de un hidrógeno ionizable que se forma por la unión de más de dos moléculas de ácido distintas, con eliminación de agua) de molibdeno o tungsteno. El más utilizado a escala industrial es el ácido silicotúngstico (17) empleando como soporte alúmina, siguiendo una estructura de Anderson-Evans-Perloff, de tal manera que se permite un fácil acceso de los reactivos al soporte para que interaccione con la superficie del catalizador.

Es preferible que el etileno que se emplee como reactivo en esta alternativa sea un producto de refinería con un contenido de impurezas metálicas inferior a 0.1 ppm, puesto que estas se acumulan en la superficie del catalizador implicando su desactivación.

Los *ratios* de los compuestos de alimentación deben mantenerse en un rango determinado (entre 6 y 12.2 para el ratio etileno-ácido acético, entre 8 y 17 para el ratio etileno-agua y entre 1.25-1.4 para la razón ácido acético-agua). Si se consiguen estas condiciones y además se realiza un control exhaustivo de las condiciones de operación, se puede conseguir que las cantidades relativas de subproductos (como etilmetilcetona, MEK) con respecto al acetato de etilo sean pequeñas lo que posibilita mejorar la economía del proceso al reducir los caudales de las corrientes de purga y optimizar la operación del sistema de purificación de corrientes de reacción, además de alargar de manera satisfactoria la vida del catalizador (los subproductos envenenan al catalizador).

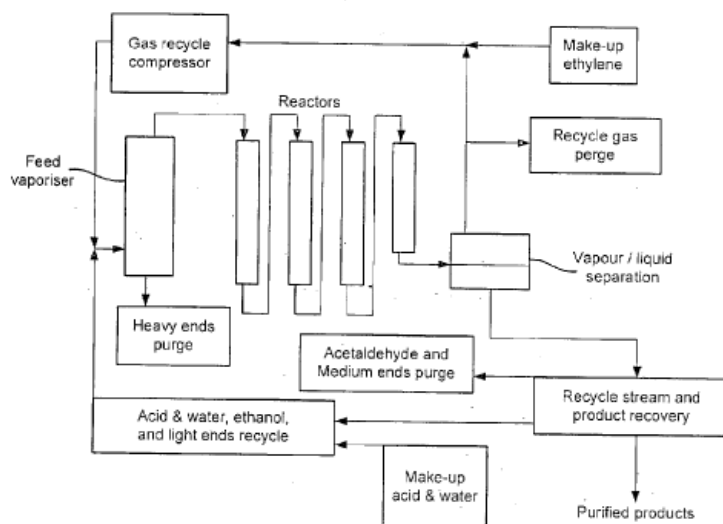


Figura 13: BFD estipulado para la alquilación de ácido acético con etileno (17)

A pesar de parecer una alternativa prometedora con respecto a las introducidas anteriormente, el hecho de utilizar un catalizador tan sensible a los fenómenos de desactivación es un punto muy negativo, ya que el reactivo es un producto de refinería que no tiene por qué cumplir las especificaciones que requiere este proceso de alquilación. Sumado a esto, se requiere un sistema de control muy efectivo para alimentar los reactivos al reactor en las proporciones óptimas puesto que en caso contrario la selectividad de las reacciones secundarias sería tan elevada que la operación no sería viable desde un enfoque industrial.

5.6 Deshidrogenación de etanol

Esta alternativa de proceso de producción, al contrario que todas las anteriores, parte de un único reactivo, etanol, cuya procedencia puede ser de una planta petroquímica (a partir del etileno) o bien emplear etanol obtenido de manera natural a partir de la fermentación de materia orgánica (como cereales o remolacha azucarera), más conocido con el nombre de bioetanol de 1ª generación, o a partir de la fermentación de residuos o biomasa: bioetanol de 2ª generación, preferible por diversas cuestiones de sostenibilidad.

El estudio cinético asociado a las reacciones que implican la deshidrogenación de etanol fue llevado a cabo primeramente por W. S Colley y la compañía Davy Process Technology (13) a mediados de la última década del siglo pasado con el fin de encontrar un catalizador que proporcionase una selectividad elevada en la reacción de deshidrogenación a acetato de etilo. Esta tesis doctoral finalizó con la implantación de una planta de producción basada en esta ruta de reacción en Sudáfrica en colaboración con Sasol Company, la cual continúa funcionando de manera eficiente en la actualidad.

Este proceso se basa en una serie de etapas claramente diferenciadas: puesto que la alimentación no consta únicamente de etanol, sino que contiene otros compuestos problemáticos que no pueden separarse fácilmente del acetato de etilo, esta alimentación ha de acondicionarse antes de alimentarse al reactor de deshidrogenación catalítica. Con este fin, se utilizan unidades de separación, como columnas de separación, de tal manera que la corriente de salida contenga únicamente etanol; en el caso de que la alimentación contenga azeótropos (es habitual conseguir etanol con una cierta proporción de agua) sería necesario incluir destilación extractiva o cualquier otro método de separación reforzada, como por ejemplo membranas.

Una vez se han conseguido las proporciones deseadas en la alimentación, la corriente de reactivos se alimenta al reactor de deshidrogenación catalítica, donde ocurren múltiples reacciones: la reacción principal cuyos productos son el acetato de etilo e hidrógeno y una serie de reacciones secundarias que dan lugar a una serie de subproductos como agua, aldehídos y cetonas de 3-4 carbonos, según el esquema propuesto por Inui (18). Puesto que la selectividad de estas reacciones secundarias es bastante elevada, la cantidad de productos no deseados obtenido es grande.

Debido a este problema, previa separación del hidrógeno en depósitos flash puesto que es un producto muy valioso para utilizar como utilidad en la propia planta, es necesario convertir estos aldehídos y cetonas en sus correspondientes alcoholes con el fin de conseguir que la sección de separación sea viable, ya que estos subproductos no son fácilmente separables del acetato de etilo. Así, tras su correspondiente adecuación, los productos de la reacción de deshidrogenación se alimentan a un reactor de pulido donde se producen reacciones de hidrogenación catalizadas por un entramado de rutenio y carbono. Con los subproductos convertidos en alcoholes, comienza la sección de separación de la planta de proceso.

La configuración adoptada tradicionalmente para romper los azeótropos se basa en una disposición de *Pressure Swing Distillation*, puesto que la composición de los azeótropos (tanto ternario acetato-etanol-agua como binarios acetato-agua, acetato-etanol y etanol-agua) varía de manera significativa con el cambio de presión; la primera columna del sistema PSD es la de baja presión (1 bar) por lo que hay que disminuir la presión de la corriente de salida del reactor de pulido antes de alimentarla a la sección de separación; la segunda columna trabaja a alta presión (9 bar) por lo que la corriente de la primera columna debe ser impulsada mediante el uso de una bomba centrífuga. Con esta configuración, se consiguen dos corrientes: una rica en acetato de etilo (al 99.5% aprox.) y otra rica en etanol, que se recircula al reactor de deshidrogenación (19).

La pureza en acetato de etilo obtenida tras las columnas bajo la configuración PSD podría ser suficiente para la mayor parte de las aplicaciones comerciales del acetato de

etilo; sin embargo, añadir una pequeña torre de purificación incrementa la pureza a valores superiores al 99.8% sin incurrir en grandes costes extra. En la figura 14 se adjunta un pequeño diagrama de bloques propuesto por el propio W.S. Colley.

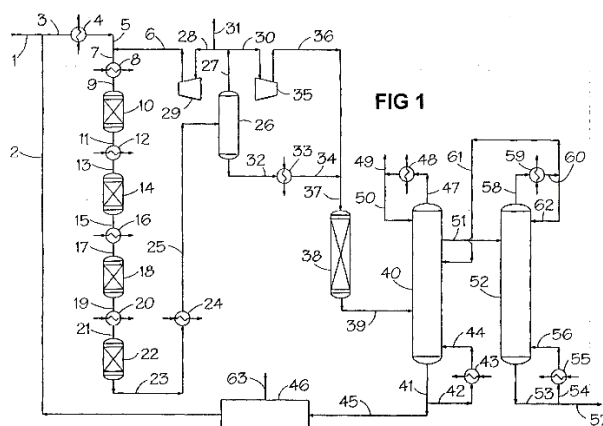


Figura 14: BFD de la planta de obtención de acetato de etilo mediante deshidrogenación de etanol adoptada tras los estudios de W.S. Colley (19)

Debido a lo prometedora que resulta esta ruta de reacción, se realizaron investigaciones posteriores para tratar de dar con un catalizador que consiguiese una mayor selectividad en la reacción principal sin ver comprometida la conversión de etanol, que viene delimitada por el equilibrio termodinámico. Carotenuto et al. (16) llevaron a cabo comparaciones entre diferentes catalizadores comerciales, encontrando uno de la casa comercial BASF que proporcionó unos resultados por encima de los esperados. Con el fin de poder diseñar un proceso de producción de acetato de etilo empleando un único reactor de deshidrogenación, llevaron a cabo un estudio cinético (20) donde se consiguieron expresiones muy fiables para explicitar las cinéticas que modelizan matemáticamente las reacciones que tienen lugar en el reactor de deshidrogenación, abriendo las puertas al desarrollo de una planta de proceso pionera en el mundo (esquematización en la figura 15), donde se desarrolla una operación sostenible y altamente eficiente desde el punto de vista energético, siendo esta propuesta el *leitmotiv* del presente documento.

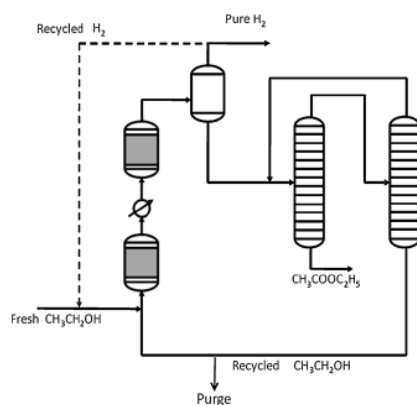


Figura 15: BFD que recoge las innovaciones al diseño propuestas tras los últimos estudios (20)

6. Selección justificada de la alternativa de producción: proceso, reactivos, catalizador y sección de separación.

Llevando a cabo un análisis crítico de las diferentes alternativas presentadas en el apartado anterior resulta lógico seleccionar el proceso basado en la deshidrogenación de etanol, justificando el empleo del catalizador de la casa BASF que posibilita una elevadísima selectividad en la reacción que deriva en la obtención del producto deseado, acetato de etilo. Asimismo, en este apartado se justificará el diseño de una sección de separación novedoso, siendo diferente al propuesto en los estudios iniciales de W. Colley (13) y G. Carotenuto (16). Lógicamente se indicarán los pros y contras con el fin de justificar de manera acertada la selección final. A modo de resumen, los principales puntos en los cuales se sustenta la elección de este proceso son:

- Utilización de un único reactivo, lo que posibilita una disminución de costes de inversión, operación y mantenimiento. Además, se trata de un compuesto que no es corrosivo con los materiales de uso común en las construcciones ingenieriles, por lo que no será necesario emplear equipamiento especializado para llevar a cabo el proceso.
- Impulsar una industria sostenible que sea respetuosa con el bienestar del medio ambiente y de la sociedad mediante el establecimiento de una planta de proceso que tenga prácticamente nula huella de carbono, al utilizar como materia prima principal un reactivo procedente de la fermentación de materia orgánica y como *entrainer* un líquido iónico cuya recuperación se lleva a cabo de manera sencilla sin la necesidad de emplear una columna de destilación, implementando una operación altamente eficiente.
- Emplear una planta de proceso basada en un único esquema reactivo: la 3ª alternativa presentada depende primero de la consecución de acetaldehído a partir del proceso Wacker-Hoechst para después hacer reaccionar este compuesto siguiendo una reacción de dimerización. Asimismo, la alternativa de oxidación de etanol primero oxida este reactivo a ácido acético empleando un catalizador para posteriormente hacer reaccionar el etanol en exceso con el ácido formado empleando un nuevo entramado catalítico. En la alternativa escogida, se utiliza un solo reactor con un catalizador único.
- Se puede considerar además como un proceso autosostenible en tanto a que el subproducto principal de reacción es hidrógeno libre de CO_x que puede ser destinado a su combustión en calderas con la finalidad de generar utilidades que permitan la operación viable de la planta de proceso.
- Se trata asimismo de un proceso en el que no se ven involucradas temperaturas extremas, de ahí que las utilidades necesarias para tener la operación bajo control sean relativamente económicas; la temperatura más elevada se alcanza en el fluido calefactor que compensa el efecto endotérmico de las reacciones y se introduce mediante un aceite térmico especial destinado

a tal finalidad. El resto de temperaturas se pueden alcanzar bien sea con vapor de alta presión (hasta 230 °C) para el caso de calentamiento o con *cooling water* (hasta 30 °C) para las casuísticas de enfriamiento (a excepción del condensador de la torre de purificación T-403 que requiere agua de refrigeración a 10°C).

En los últimos años el principal interés de la investigación tanto a nivel académico como a nivel industrial está estrechamente relacionado con el desarrollo de una industria química lo más limpia posible con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (entre muchos otros aspectos), que son la principal causa del calentamiento global. Con este propósito, debido al futuro agotamiento de los recursos no renovables y al ya mencionado cambio climático, numerosos estudios han sido realizados con el fin de ir introduciendo fuentes de energía basadas en recursos renovables y así conseguir una sustitución progresiva de aquellos compuestos que generen un mayor impacto ambiental.

Sin embargo, estos avances no finalizan aquí, dado que la investigación también se ha encaminado hacia el diseño de complejos industriales *eco-friendly* cuyos procesos se basan en biomasa, reconocida ampliamente como un sustituto de los combustibles fósiles para garantizar un desarrollo sostenible de la sociedad. Existen numerosos tipos de biomasa disponibles a gran escala y a unos precios tales que pueden competir con el petróleo tanto en términos másicos, energéticos y tecnológicos. En particular, una gran atención ha sido dirigida hacia procesos basados en el bioetanol como principal reactivo (*feedstock*), disminuyendo así la obtención de este alcohol a partir de etileno de refinerías.

Hoy en día el bioetanol se produce principalmente a partir de la fermentación de caña de azúcar, melaza y remolacha azucarera en países europeos y Brasil y a partir de granos de maíz y cereales (por ejemplo, trigo) en Estados Unidos, Canadá y países asiáticos. La utilización de estas materias primas de primera generación implica una producción limitada de estos biocombustibles con el fin de que el suministro de alimentos y la biodiversidad no se vean amenazados. Para solucionar estos problemas, se opta por la producción a partir de materias primas de segunda generación, consiguiendo mayores beneficios desde un enfoque medioambiental además de apostar así por una industria sostenible de tal manera que las necesidades alimenticias de las generaciones futuras no se vean comprometidas (21).

Centrándose exclusivamente en la producción de bioetanol de bajo coste, una posible solución puede ser el uso de materias primas consideradas como residuos (residuos de cultivos, pastos, serrín, lodos...). Es por lo tanto destacable mencionar que el principal desafío se basa en la capacidad de desarrollar la tecnología necesaria para convertir la biomasa original en productos químicos de alto valor.

En el contexto de la planta de producción sobre la que trata este trabajo, el bioetanol obtenido se utiliza como reactivo para la obtención de acetato de etilo (con acetaldehído como producto intermedio) consiguiendo además hidrógeno como subproducto, considerado por muchos expertos el combustible del futuro para pilas destinadas al movimiento de vehículos (*fuel cells*). Este H₂ obtenido puede además ser alimentado al reactor catalítico de deshidrogenación para alargar la vida útil del catalizador y limitar la formación de acetaldehído, manteniendo baja su concentración desfavoreciendo de este modo el equilibrio de auto-condensación.

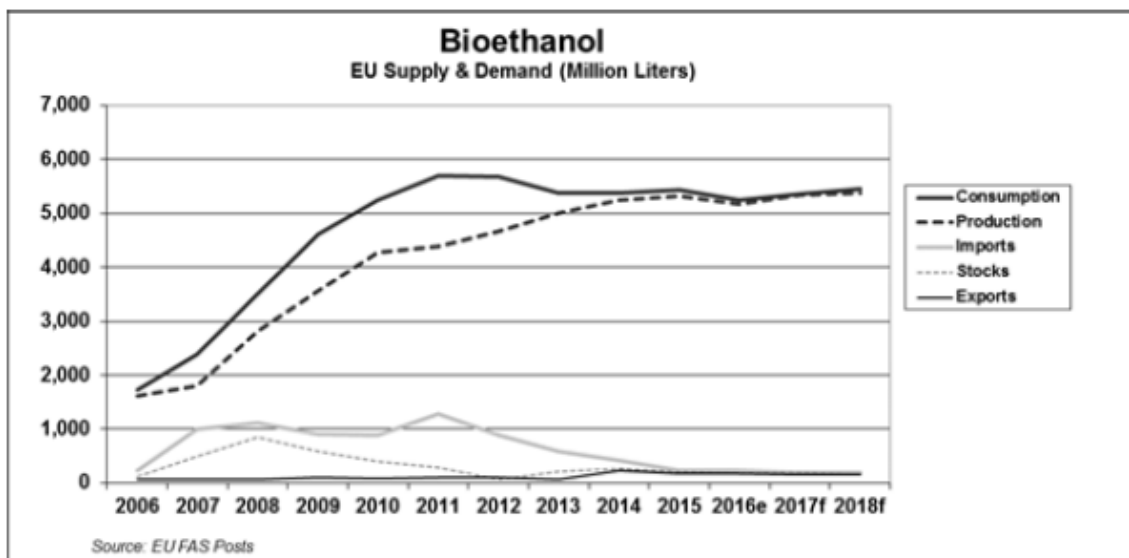


Figura 16: Oferta y demanda de bioetanol en la última década (22)

La producción europea de bioetanol se estima que siga creciendo al menos hasta 2020 debido a dos aspectos fundamentales: el incremento de capacidad de las plantas existentes y la concienciación de los países de la Zona Euro con el fin de cumplir las políticas sobre energías renovables establecidas para el año 2020, lo cual ha derivado en un crecimiento del volumen de producción superior del 250% en 10 años. Estas tendencias se pueden observar en la figura 16.

La disminución de los precios de las materias primas empleadas en la producción de bioetanol (fermentación de cereales, remolacha azucarera...) ha provocado un descenso en el precio de venta del bioetanol, lo cual puede ser visto como una oportunidad para poner en marcha procesos de producción basados en recursos renovables puesto que además de reducir de manera considerable el impacto ambiental, también aumentan los beneficios económicos derivados de la actividad industrial (23). Esta tendencia a la baja del importe se puede observar en la figura 17.

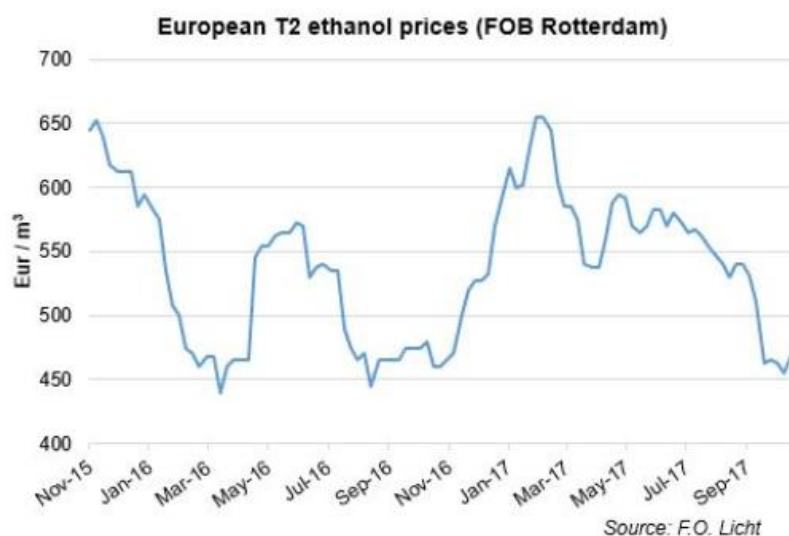


Figura 17: Evolución del precio del bioetanol en Europa en los últimos dos años (23)

Resultaría positivo tratar de dar salida al bioetanol producido en la región, para así dotar a la zona de cierta estabilidad económica. Un ejemplo sería el caso de España: en el año 2016 la producción del país se redujo de manera significativa ya que la mayor planta de producción (Bioetanol Galicia con una capacidad de producción de 200 000 toneladas/año) detuvo su producción debido a la quiebra económica de la empresa económica que se encargaba de su operación (Abengoa). La planta fue comprada en 2017 por un fondo de inversiones norteamericano, Trilantic Europe, con lo que se garantiza la continuidad de sus operaciones productivas (24, 25).

Para finalizar este estudio, se darán una serie de pinceladas acerca del ácido acético, el otro reactivo utilizado en la principal alternativa actual de obtención de acetato de etilo; el 20% de la producción global se destina a la obtención de acetato de etilo y acetato de butilo. En los próximos años (hasta 2021) se estima un crecimiento global del 3.5%, liderado por un impulso brutal procedente de China donde se espera un incremento de la tasa anual del 5% dirigido principalmente por la gran demanda de ácido tereftálico destinado a la consecución de objetos contruidos con polietileno de tereftalato (PET) (26, 27).

No obstante, estas estimaciones no tienen en cuenta posibles contingencias que pueden voltear los mercados de manera radical. A finales del 2017, un accidente en la unidad de gasificación de carbón en la planta principal de producción de ácido acético de Eastman Company US (en el estado de Tennessee) supuso una pérdida de suministro procedente de una planta con una capacidad de prácticamente 300 000 toneladas de ácido acético al año, con un incremento brutal de los precios alcanzando precios máximos en el rango del último lustro. Los efectos del Huracán Harvey también provocaron pérdidas de capacidad de suministro, principalmente en el tejido industrial del estado de Texas (28). Estos sucesos no solo han tenido repercusiones en el mercado norteamericano, sino que los mercados que dependen en gran medida de

importaciones, como el europeo (que solamente dispone de una gran planta de producción de ácido acético), también se vieron perjudicados: los precios de importación del ácido acético se vieron incrementados en un 15%.

Habiendo justificado la selección del proceso basado en la deshidrogenación de bioetanol, es necesario seleccionar de manera adecuada el catalizador que se va a emplear puesto que una correcta elección puede suponer enormes ahorros en la operación de la planta. Como se ha indicado en el final del apartado 4.6 *Deshidrogenación de etanol*, la primera planta de producción basada en esta ruta de reacción empleaba un catalizador de cobre cuya selectividad en acetato de etilo era tan baja que era necesario incluir un segundo reactor de hidrogenación (reactor de pulido) para convertir los subproductos (principalmente aldehídos y cetonas derivados del acetaldo) en alcoholes con la finalidad de que la sección de separación fuese viable.

Es por este motivo por el que para el proceso introducido en este proyecto se elige un catalizador tal que la operación global pueda ser llevada a cabo utilizando un único reactor, o lo que es lo mismo, utilizando un catalizador cuya selectividad en acetato de etilo sea muy alta. La reacción de deshidrogenación de etanol a acetato de etilo fue estudiada por primera vez en 1936 por Dolgov et al.¹ empleando catalizadores basados en cobre, por lo que el estudio llevado a cabo se basará en las directrices trazadas por las primeras investigaciones comparando la actuación de tres catalizadores comerciales de las casas Sud Chemie y BASF.

El catalizador CuO/Cu/CuCr₂O₄/Al₂O₃/BaCrO₄ (45:1:13:11:30 %wt) proporciona los mejores resultados en términos de actividad, selectividad y aguante a la desactivación: 65% de conversión de etanol (se corresponde con la máxima alcanzable en condiciones de equilibrio), una selectividad en acetato de etilo superior al 98% y siendo utilizado en ensayos durante varios meses sin mostrar signo alguno de desactivación. Se trata de un catalizador de cobre, óxido de cobre (la presencia de óxidos tiene como finalidad reducir la desactivación del catalizador a consecuencia de la sinterización del cobre) y cromito de cobre (catalizador de Adkins clásico) pre-reducido, soportado en alúmina y utilizando cromato de bario como promotor para así crear un ambiente ácido-base favorable para la reacción deseada. El catalizador se comercializa en forma de pequeños cilindros irregulares de 1.8 mm de diámetro y altura variable entre 3 y 5 mm (20).

Estos resultados en conversión, selectividad y tolerancia a la desactivación se atribuyen a la particular estructura del catalizador, que posee cobre puro dispuesto de manera epitaxial (laminar) en la superficie del cromito durante la reducción con H₂ (que activa el catalizador, limitando por tanto su desactivación) y al ambiente ácido que se forma en torno a este Cu⁰: $\text{Cu}^2 + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + \text{Cu}^0$. La presencia del cobre puro

¹ B.N. Dolgov, M.M. Koton, N.V. Siderov, Journal of General Chemistry USSR 6 (1936) 1456.

promociona las reacciones de deshidrogenación mientras que el ambiente ácido obstaculiza la autocondensación (dimerización) de las moléculas de acetaldehído para dar acetaldol, de ahí que la selectividad de las reacciones secundarias sea muy baja.

El soporte de alúmina influye positivamente en el efecto de dispersión de los cristales de cromito de cobre (unos estudios de White et al.² demostraron que átomos aislados de Cu son más selectivos en tanto a la producción de acetaldehído mientras que la formación de acetato de etilo se ve potenciada con catalizadores muy poco dispersos) y el cromato de bario que actúa como promotor tiene un efecto positivo al evitar la desactivación del catalizador; particularmente, el BaO tiene un efecto positivo al neutralizar los centros ácidos de Lewis del cromato y de la alúmina generando así una barrera mucho más eficiente a la sinterización y limitando, como consecuencia de esta neutralización, la fuerza de los centros ácidos y/o básicos que podrían llegar a modificar la selectividad de una manera no deseada, obstaculizando la autocondensación del acetaldehído para dar acetaldol (20).

Estos resultados tan prometedores motivaron la realización de un estudio cinético del catalizador con el fin de poder diseñar un reactor que sea la piedra angular del proceso que en este TFG se presenta. La alimentación al proceso es una corriente impura de bioetanol (impurezas de acetaldehído obtenidas durante el proceso de fermentación); la salida del reactor consiste en una corriente rica en acetato de etilo que contiene el etanol que no ha reaccionado además de pequeñas cantidades de acetaldehído y otros subproductos, que se pueden agrupar como acetaldol (*ver Anexo I. Balances de materia y energía*). El principal problema a la hora de diseñar la sección de separación radica en la presencia del azeótropo acetato de etilo-etanol, por lo que una destilación convencional no basta para aislar el producto puro y el reactivo que no haya reaccionado. El desafío de solventar este problema ha sido acometido históricamente de manera eficaz, mas no de forma eficiente; es por este motivo por el que en este apartado se justificará el diseño de una novedosa sección de separación.

Desde un enfoque “tradicional”, esta separación se ha acometido empleando un tren de columnas de destilación en configuración de *Pressure Swing Distillation* aprovechando la sensibilidad de la composición del azeótropo a cambios en la presión, empleando en primer lugar una columna de destilación a baja presión (*Lights Column*) y posteriormente a elevada presión (*Heavies Column*), consiguiendo así una corriente rica en acetato de etilo (>95% en acetato de etilo) que cumple o no las condiciones exigidas por el mercado y una rica en etanol que se recicla a la entrada del reactor. No obstante, este esquema no sería del todo eficiente teniendo en cuenta que la reacción con el nuevo catalizador se debe realizar a presiones moderadamente altas (20 bar) para favorecer la producción de acetato de etilo, ya que a presión atmosférica el equilibrio se desplaza de manera unidireccional hacia la obtención de acetaldehído; el

² M.G. White, J.C. Kenvin, Journal of Catalysis 135 (1992) 81–91.

hecho de realizar la reacción a presiones elevadas para después disminuirla con el fin de operar la primera etapa del PSD y finalmente volver a aumentarla para concluir la configuración de *Pressure Swing Distillation* no es rentable ni fácil de controlar (13,19).

La otra configuración empleada para poder romper el azeótropo es la utilización de un tercer compuesto, conocido como *entrainer*, que se introduce en el interior de la columna para así efectuar una destilación azeotrópica extractiva. De todos los compuestos individuales estudiados, el que proporciona mejores resultados es el 1,4-butanodiol (volatilidad relativa de 3.43), siendo necesario utilizar un *ratio* de 2:1 en términos másicos (*entrainer*:alimentación a la columna). A pesar de romper el azeótropo, es necesario añadir una gran cantidad de tercer compuesto lo que implica directamente en la construcción de columnas de destilación más grandes, que no solamente aumenta los costes de construcción sino también de operación, puesto que este *entrainer* tiene un alto punto de ebullición y por tanto el calderín de fondos de la columna requiere un alto consumo de utilidades; sumado a esto, la separación no es ideal ni mucho menos, por lo que el reciclo de *entrainer* con el fin de conseguir una operación viable irá acompañado de los compuestos químicos más pesados que se ven involucrados en la sección de separación (29).

La destilación extractiva también se puede realizar a cabo empleando sales sólidas, lo cual no es recomendable del todo dado que esta puede precipitar en el sistema al cambiar la composición de la mezcla (por fenómenos de saturación), causando daño físico a los platos de la columna de destilación. Es por este motivo por el que se justifica el uso de un líquido iónico para romper el azeótropo etanol-acetato de etilo: empleando metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio, [emim][MeSO₃], el azeótropo se rompe en una proporción 0.025:1 en base molar (líquido iónico:alimentación columna), lo cual se corresponde con la cantidad más baja - registrada en la literatura- de líquido iónico necesaria para romper cualquier sistema azeotrópico (30).

Asimismo, la no-volatilidad de los líquidos iónicos facilitan su posterior separación (en un depósito flash, no es necesaria una columna de separación) para su reciclo; sumado a esto, su gran estabilidad térmica significa que no se van a degradar en el proceso de destilación de tal manera que su uso se puede prolongar durante grandes periodos de tiempo, ya que se trabaja a temperaturas lejanas a las de descomposición (a partir de 150°C). Finalmente, un líquido iónico puede pasar a través del equipamiento sin dañar el sistema, al no existir problemas de precipitación como en el caso de emplear una solución salina (30).

Por lo tanto, se puede observar que la selección de la alternativa se cimenta en aspectos de diversa índole: desde un punto de vista ambiental se decide apostar por un proceso respetuoso con el medio ambiente y con escasa huella de carbono que emplea como reactivo un producto obtenido -preferiblemente- a partir de procesos fermentativos de materiales naturales de segunda generación, como pueden residuos

de alimentos o de biomasa. Además, el único subproducto del proceso es hidrógeno puro, que es el combustible más limpio y con mayores expectativas de uso en un futuro no muy lejano, utilizable en la propia planta o exportable después de un proceso de compresión. Desde un enfoque operacional se valora enormemente la introducción de un proceso simple que conste de un único reactor y de una sección de separación configurada por columnas de destilación; para romper el azeótropo se apuesta por un líquido iónico que permite una operación altamente eficiente desde el punto de vista energético, además de constituir un *entrainer* sostenible y que impulsa la filosofía de una industria “verde”.

La ausencia de productos corrosivos también permite emplear materiales más sencillos que impliquen una menor inversión y costes de mantenimiento más bajos. El uso de un catalizador comercial, más económico, para fomentar la selectividad en acetato de etilo también es una ventaja a la hora de valorar esta alternativa. Finalmente, desde un punto de vista económico, se apuesta por proporcionar estabilidad a la región gallega y acelerar el pequeño tejido industrial aprovechando el hecho de disponer de una planta de producción de bioetanol de gran capacidad, lo que permite cubrir la cada vez mayor demanda de acetato de etilo (según predicciones del mercado) disminuyendo al máximo los costes logísticos asociados a los reactivos necesarios.

7. Estudio de viabilidad técnica

En esta parte del proyecto se va a determinar si la tecnología disponible en la actualidad permite que se materialice el proyecto y si es conveniente hacerlo. La capacidad escogida se basa en la heurística que proporciona la única planta de producción de acetato de etilo cuya obtención se basa en la deshidrogenación de etanol. Una vez comprobado que es técnicamente posible, hay que examinar los costes asociados a la operabilidad, que se computan mediante el cálculo del beneficio bruto.

7.1 Viabilidad de la tecnología seleccionada

Los procesos tradicionales para la obtención del producto son viables (lógicamente) desde un punto de vista técnico, puesto que el equipamiento y la tecnología han sido implantados, empleados y optimizados con el paso de los años; así, las alternativas basadas en la esterificación de Fischer de etanol y ácido acético y las basadas en la reacción de Tishchenko (bien a partir de acetaldehído puro u obtenido mediante el proceso Wacker-Hoechst) se podrían aplicar para una planta de producción de acetato de etilo, pero las desventajas en términos de seguridad y salud, energéticos y económicos (varios reactores, múltiples reactivos, equipamiento especial, secciones de separación que demanden elevadas cantidades de energía) provocan que se descarte que el diseño de una nueva planta de producción se base en este tipo de tecnología. El proceso basado en la oxidación de etanol no se puede aplicar a escala industrial puesto que solo es viable económicamente si se realiza en un solo reactor con un catalizador único, mientras que la alquilación de ácido acético se ha descartado por una selectividad muy baja en el producto deseado.

Por contra, el proceso escogido es una versión mejorada del proceso DAVYTM patentado por la empresa Johnson Matthey siguiendo los estudios de Colley et al (13), presentado en la figura 18 en forma de diagrama de bloques, puesto que con la operación única del reactor de deshidrogenación el proceso es evidentemente viable desde un punto de vista técnico, con los beneficios económicos que significan la operación empleando una única zona de reacción.

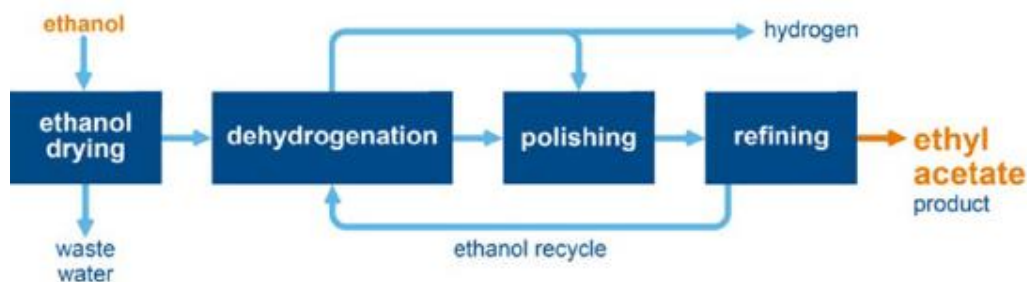


Figura 18: BFD del Proceso DAVY original para la obtención de acetato de etilo (31)

Los estudios de la factibilidad del uso del catalizador para llevar a cabo la deshidrogenación catalítica de etanol (20), sumados a la modelización matemática con la que concluye el estudio cinético (32) demuestran que el catalizador BASF Cu-1234-1/16-3F permite llevar a cabo la reacción con una elevada selectividad en acetato de etilo consiguiendo además la máxima conversión del reactivo limitante por paso. Esta mejora del tradicional proceso DAVY™ permite ahorrar los altísimos costes asociados al reactor de pulido, donde se llevan a cabo las hidrogenaciones de los subproductos, principalmente aldehídos y cetonas de 3-4 carbonos.

El reactor sigue la configuración de un reactor de flujo en pistón multitubular, donde los tubos están llenos de pellets cilíndricos de catalizador. Se adopta este esquema con el fin de aumentar el área de intercambio de calor ya que al ser la reacción de deshidrogenación a acetato de etilo endotérmica es necesario incluir un fluido calefactor por carcasa para compensar el descenso de temperatura: puesto que la temperatura óptima de operación es superior a los 200 °C se justifica el uso de un aceite térmico de la casa DOW (Dowtherm Q, en este caso) que fluirá a través de la carcasa del reactor en un circuito cerrado; se escoge este aceite debido a su baja viscosidad y a su gran estabilidad térmica en comparación con otros fluidos similares.

Finalmente, la sección de separación se diseña en torno a la ruptura del azeótropo binario etanol-acetato de etilo, tratando de conseguir una operación económica y altamente eficiente desde un punto de vista energético. Por este motivo, se emplea un líquido iónico como *entrainer* cuyo rendimiento en términos de flujo másico y factor de separación (coeficientes infinitos de actividad) son los mejores que se han encontrado hasta la fecha para un compuesto de este tipo (38). La purificación de las corrientes ricas en producto y en el reactivo no reaccionante se obtiene por destilación tradicional empleando pocas etapas, aprovechando el alto factor de separación propiciado por la alta y baja volatilidad del acetaldehído y acetaldol respectivamente, de ahí que los costes asociados no sean excesivamente elevados.

7.2 Disponibilidad de materias primas y venta de productos

Otro de los requisitos necesarios para que una planta de proceso sea viable desde un punto de vista técnico es la disponibilidad de materias primas en la cantidad necesaria para poder satisfacer la capacidad de la planta; es también importante que cumpla unos requisitos mínimos de calidad si se desea evitar una zona de acondicionamiento de la alimentación (a veces es inevitable incluir una en el diseño) que encarezca los costes.

En este caso, el principal reactivo es bioetanol obtenido a partir de la fermentación de materia orgánica (preferiblemente, residuos o biomasa). Por este motivo, la planta de producción de acetato de etilo se ha de emplazar, a ser posible, lo más cerca posible de una planta de producción de bioetanol de alta capacidad. Al tratarse éste del único reactivo de la planta de producción esta consideración es crítica para que la operación

sea viable, evitando así posibles cortes de suministro debido a problemas logísticos de transporte. Es importante además considerar que esta corriente de alcohol de origen natural no se proporciona con una pureza del 100%, puesto que la fermentación también implica reacciones secundarias; por ejemplo, uno de los subproductos típicos de este tipo de reactividad fermentativa es acetaldehído. En tanto a la venta de productos, teniendo en cuenta las predicciones optimistas de crecimiento de mercado del acetato de etilo en Europa el establecimiento de la planta para satisfacer las necesidades futuras está más que justificado.

En lo tocante al catalizador, teniendo en cuenta su gran tolerancia a la desactivación, se considera viable su actividad a lo largo de un año de operación de la planta, aprovechando para su sustitución el mes de parón destinado a operaciones de mantenimiento. Finalmente, en lo relativo al *entrainer* para romper el azeótropo acetato de etilo-etanol y conseguir corrientes con alta pureza en el producto deseado y en el reactivo no reaccionante destinado a reciclo, se opta por una destilación extractiva altamente eficiente y sostenible, aprovechando las características privilegiadas de las que gozan los líquidos iónicos. El correcto funcionamiento de la primera columna de destilación depende en gran medida del suministro de [emim][MeSO₃], que se garantiza contractualmente con la casa proveedora.

7.3 Disponibilidad de utilidades

La planta requiere de una serie de utilidades, además del reactivo, para su correcto funcionamiento:

- Fluido calefactor: puesto que la reacción que tiene lugar en el reactor multitubular es moderadamente endotérmica, con el fin de mantener la temperatura en un rango que garantice una conversión y selectividad elevadas es necesario realizar un aporte de calor a la mezcla reaccionante desde el lado de carcasa. Ya que la temperatura óptima de reacción supera los 200 °C se opta por el uso de un aceite térmico de la casa DOW, Dowtherm Q, aprovechando su baja viscosidad y elevada estabilidad térmica, además de un alto calor específico.
- Energía eléctrica: suministrada de forma directa desde la red eléctrica a la cual la planta tiene acceso desde el Polígono Industrial, disponiendo de conexiones de alta y baja tensión, además de transformadores proporcionados por el propio complejo industrial.
- Vapor: una de las ventajas de la ruta de reacción escogida es que el principal subproducto es la producción de aproximadamente 300 kg/h de hidrógeno, que puede ser destinado a combustión en una caldera para calentar agua. No obstante, se plantea asimismo la instalación de una unidad de generación de vapor adicional para cumplir con la demanda de este tipo de energía (destinada

principalmente a su uso en intercambiadores de calor y a los reboilers de las columnas de destilación) que funcionaría con combustible económico, véase el siguiente punto.

- Gas natural: la planta necesita suministro de este combustible barato como utilidad para su combustión con el fin de desprender energía que se utilice en la generación de vapor de agua en una caldera. Sumado a su bajo precio, es el combustible más empleado para este fin debido a que es el que menos contamina (menor producción estequiométrica de CO₂).
- Aire comprimido: las instalaciones neumáticas son las más fiables para garantizar el correcto funcionamiento de las válvulas de control (3-15 psig), de ahí que sea recomendable que la planta disponga de una estación de compresión en la que se produzca esta utilidad. El funcionamiento de los compresores se sustenta mediante energía eléctrica.
- Agua de proceso: utilizada para prácticamente cualquier operación o contingencia, más allá de enfriar corrientes de proceso. El Polígono Industrial donde se emplace la planta de proceso debe tener garantizado pues el suministro de esta utilidad.
- Agua contra incendios: al igual que el agua de proceso, ésta se obtiene a partir del río o embalse que suministre al Polígono. No obstante, para suplir posibles cortes de agua en las conducciones es muy recomendable instalar un depósito para disponer de ella independientemente de la capacidad de suministro público.
- Almacenamiento de efluentes líquidos: la planta debe incluir de una estación de almacenamiento de efluentes residuales previa a su posterior gestión por una subcontrata, que los puede destinar a valorización energética.

7.4 Disponibilidad de equipos

Además del reactor, que será el corazón del proceso y el que posibilita la configuración reflejada en el PFD, se requieren bombas centrífugas, intercambiadores de calor y columnas de destilación. También son necesarios grandes depósitos para el almacenamiento de materias primas, productos y subproductos generados con la operación de la planta.

Hoy en día se dispone de la información suficiente para ejecutar el diseño riguroso de todos estos equipos, que se utilizan de manera habitual en la industria de procesos. Así se concluye que desde el punto de vista de equipos a utilizar, este proceso es viable desde un enfoque técnico.

7.5 Seguridad en la instalación

La seguridad es uno de los aspectos críticos a la hora de la elección del proceso productivo en una planta. Teniendo en cuenta que procesos mucho más peligrosos en tanto a los reactivos utilizados (corrosividad, toxicidad...), condiciones de operación (temperaturas extremadamente bajas, reacciones muy exotérmicas) o capacidad de

operación (en este caso se opta por el diseño de una planta de capacidad relativamente baja) se desempeñan de manera muy segura, esto no iba a ser menos. La planta de proceso instalada en Sudáfrica a comienzos de este siglo continúa funcionando en la actualidad sin haber dado ningún problema a pesar de utilizar 2 reactores en condiciones moderadas de presión y temperatura, por lo que se concluye que hoy en día existe la tecnología y se dispone de la información suficiente como para controlar el proceso de la manera adecuada.

Teniendo en cuenta que la sección de separación se realiza en su totalidad a presión atmosférica y que el reactor está dimensionado con un factor de seguridad superior al 50%, además de instalar un potente lazo de control con dispositivos mecánicos de alivio (discos de ruptura, por ejemplo) se concluye sin ninguna duda que con respecto a la seguridad de la planta, ésta es viable técnicamente.

7.6 Estudio económico básico: cálculo del beneficio bruto

El beneficio bruto de un determinado proceso de transformación química se evalúa principalmente para descartar aquellos esquemas que son inviables desde un enfoque económico en tanto a que el precio de obtención de las materias primas/reactivos es mayor que el conseguido con la venta de los productos generados. El beneficio bruto (*gross profit*) se expresa en unidades monetarias por unidad de masa de acetato de etilo teniendo únicamente en cuenta la reacción química principal del proceso en cuestión (30).

La obtención de precios de mercado de compuestos químicos no es una tarea trivial, puesto que se trata de información muy valiosa que a menudo se encuentra protegida (para acceder a ella es necesario pagar pingües cantidades de dinero). Por fortuna, existen bases de datos que difunden información de manera abierta, como la del *Chemical Marketing Reporter*. Además de tablas, también existen gráficas que muestran la evolución del precio de una sustancia con el tiempo (como en el caso del bioetanol), lo que constata la enorme volatilidad de los mercados.

Para que el cálculo del beneficio bruto sea útil hay que aportar datos que se corresponda con un abanico temporal relativamente pequeño; en este caso se ha optado por precios de mercado de los últimos dos años. No obstante, la inflación de los precios no afecta por igual a todos los productos químicos por lo que no se puede garantizar que los cálculos realizados sean representativos de la situación actual.

Por otra parte, existen productos que se ven sometidos a fuertes aranceles (caso del etanol) que lógicamente alteran su precio de mercado. Si se deseara actualizar los precios al año actual habría que utilizar índices de precios; sin embargo, esto tampoco implicaría un análisis completo ya que es necesario tener en cuenta también los cambios de divisa, que tampoco son constantes con el paso del tiempo y que reflejan la situación socioeconómica de los países involucrados. Puesto que el objetivo de este

proyecto no es ni mucho menos proporcionar datos con una veracidad plena, se realiza una estimación de los beneficios brutos de los diferentes procesos.

Tabla 4: Precios de los compuestos químicos (10, 23, 28)

Producto	Precio de mercado en 2016/2017 (€/kg)
Bioetanol	0.57
Ácido acético	0.60
Etileno	0.60
Acetato de etilo	1.07

La viabilidad de estas operaciones ya se conocía puesto que son operaciones que se han realizado a escala industrial con el paso de los años; estos cálculos básicos solamente constatan un punto que ya se conocía previamente.

Tabla 5: Beneficios brutos de las alternativas de producción viables técnicamente

Alternativa de reacción	Beneficio bruto (€/kg acetato de etilo)
Esterificación de Fischer	0.37
Alquilación de ácido acético con etileno	0.49
<u>Deshidrogenación de etanol</u>	<u>0.47</u>

8. Emplazamiento

Una vez seleccionada la alternativa de producción es necesario estudiar la localización de la planta en tanto a que el suministro de reactivos o materias primas debe ser factible tanto desde un punto de vista logístico como económico. Para este proyecto se ha apostado por un diseño que transforme los menores reactivos posibles en productos de valor añadido consiguiendo el máximo rédito posible y siendo respetuosos con el medio ambiente; esta política de sostenibilidad ambiental debe ser la reinante en el futuro de la industria química.

En Galicia hay una planta de producción de bioetanol con tecnología puntera que emplea a 100 personas en el Polígono Industrial de Teixeira, situado en el Concello de Curtis. Como bien se ha dicho, la empresa (Bioetanol Galicia) era propiedad de Abengoa pero tras su quiebra ha sido adquirida por un fondo de inversiones, previo pago de 140 millones de euros (24,25); el acuerdo cerrado en marzo de 2017 se ha enmarcado en el programa de desinversiones previsto en el plan de viabilidad de la compañía y fue aprobado por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). Además, están previstas la instalación de una planta de biomasa de 50 MW administrada por Renova y una planta procesadora de leche gestionada por Goodleit (33).

Esta planta fue puesta en marcha en el año 2002 y tiene una capacidad anual de aproximadamente 200 000 toneladas de bioetanol; el superávit de energía eléctrica obtenido en la producción del etanol es superior con creces al consumo de la propia planta, por lo que el excedente es vertido a la red eléctrica nacional incrementando así la rentabilidad del proceso (34).



Figura 19: Vista aérea de la planta de Bioetanol Galicia

Por tanto, la opción más coherente es emplazar la planta de producción de acetato de etilo lo más cerca posible de la industria encargada de suministrar su único reactivo con el fin de disminuir costes logísticos de transporte y almacenamiento. De este modo, el complejo industrial se localizará en el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro,

que consta de una superficie de 1 810 092 m² destinada a uso industrial, con un equipamiento que responde perfectamente a las exigencias de cualquier empresa o industria. Toda la información adjuntada a continuación se ha extraído de la página web oficial del polígono industrial (35).



Figura 20: Parcelas a emplear (en rojo) sobre el plano de implantación del polígono industrial (35)

En cuanto a las comunicaciones el Polígono Industrial de Teixeira se encuentra situado de manera privilegiada en el contexto de la geografía gallega, a 35 minutos de las ciudades de A Coruña, Lugo y Santiago, con Curtis comunicado por carretera con la A-6 (autovía A Coruña – Madrid a 5 km) y con la N-634 (nacional San Sebastián – Santiago al frente). Las actuaciones llevadas a cabo durante los últimos diez años invirtieron la histórica situación deficitaria de la red viaria gallega, multiplicando por cinco los kilómetros de autovías y autopistas; esta estrategia es de vital importancia para la movilidad y la competitividad económica de Galicia, dada su situación geográfica. Además, es importante destacar que entre los planes de futuro se encuentra la Transcantábrica Galega, que permitiría llegar a Francia y Europa a través de una única vía de alta capacidad, cruzando Asturias, Cantabria y el País Vasco pasando por Curtis-Teixeiro.

En lo relativo a las comunicaciones marítimas, Galicia ocupa una posición privilegiada con más de 120 puertos a lo largo de su costa. A destacar, los puertos de A Coruña y Vigo están situados en las principales rutas de transporte marítimo entre Europa, América y Asia; Vigo es además una de las cinco Zonas Francas existentes a nivel peninsular, con el fin de potenciar el comercio internacional y el desarrollo económico

desde el noroeste de la península debido a las ventajas asociadas en términos de importación y exportación. Sin embargo, el puerto grande más cercano es el de A Coruña, que es uno de los 30 puertos de interés general (en España) que posee una Autoridad Portuaria propia, con una conexión directa con la red viaria a través de la Nacional-VI.

Una vez estudiadas las comunicaciones, es importante centrarse en las infraestructuras y servicios del polígono industrial. La línea eléctrica de Alta Tensión (220 000 V) que abastece el Polígono Industrial de Curtis-TeXeiro proviene directamente de la central de Meirama, (administrada por Gas Natural-Fenosa) que genera energía eléctrica de origen térmico, y que alimenta directamente a una subestación situada en el límite oeste del polígono; esta subestación también se alimenta del salto de agua situado en el Río Mandeo. Además, para garantizar la alimentación se realizará un Centro de Reflexión y un Centro de Reparto de donde se procederá al tendido de cuatro líneas de distribución (además de la línea base) que abastecerán a todas las parcelas y centros de transformación que así lo necesiten. Se dispone además de líneas de Media Tensión y de Baja Tensión proyectadas de manera subterránea que pueden distribuir energía a las parcelas teniendo en cuenta sus demandas.

El suministro de gas natural también se ve garantizado con el convenio directo con la planta de Reganosa situada en la zona de Mugardos (cerca de Ferrol, en la provincia de A Coruña) de cuyo gaseoducto principal sale una derivación de alta presión a 80 bar con dirección a Curtis. En el ámbito de las energías renovables, Galicia es puntera en términos de energía eólica e hidráulica (aproximadamente un tercio de la energía primaria autóctona de Galicia tiene origen sostenible).

El abastecimiento de agua se basa en una captación directa desde el río Mandeo hasta el núcleo industrial, donde se tiene una concesión otorgada por la Dirección General de Obras Hidráulicas de 74 L/s. Dentro de la Zona Verde Central del polígono se ubican los depósitos reguladores: un depósito de agua bruta con capacidad para 3 400 m³ y otro para agua tratada con capacidad para 5 500 m³, además de una Estación de Tratamiento de Agua Potable. El saneamiento de aguas pluviales y residuales es de tipo separativo, incluyendo el complejo industrial una EDAR: una vez depuradas estas aguas sucias y conseguidas las condiciones exigidas serán vertidas al Río Mandeo por medio de un emisario.

Puesto que la capacidad de la planta de bioetanol es 200 000 toneladas anuales, 4 veces más que la producción de acetato de etilo, se infiere que la extensión superficial de esta última tendrá que ser aproximadamente 4 veces menor. Utilizando la herramienta de medida de extensión que habilita Google Maps se conoce la extensión superficial de la planta de Bioetanol Galicia: aproximadamente 85 000 m². Puesto que la planta del éster es relativamente simple se asume que 30 000 m² de extensión

bastarán para su emplazamiento, por lo que se asume la compra de las 3 parcelas (cada una de 10 000 m²) señaladas en rojo en el plano del Polígono Industrial de Teixeira (ver arriba) situadas a unos 500 m de Bioetanol Galicia serán más que suficientes. Si se requiriese de más extensión superficial, se procedería a la compra de parcelas anexas a las señaladas con líneas rojas en la figura 21.



Figura 21: Mapa del emplazamiento extraído de Google Maps. En imagen, el Polígono Industrial de Teixeira

8.1 Climatología de la zona

El clima en Teixeira es suave, con tendencia general a ser cálido y templado. La lluvia en el municipio aterriza principalmente en invierno, con pocas precipitaciones en verano. Este comportamiento climatológico está clasificado como CSB según la escala de los científicos Köppen y Geiger: la temperatura media del mes más cálido no supera los 22 °C pero se disminuye a menos de los 10 °C durante cuatro o más meses al año. Con una temperatura media de 18.7 °C agosto es el mes más caluroso del año; a 7.5 °C de promedio enero es el mes más frío del año. En cuanto a las precipitaciones, la más baja es en julio con una media de 37 mm y la más elevada en diciembre, con aproximadamente 170 mm; la precipitación media aproximada es de 1230 mm (36). Toda esta información se resume de manera más gráfica en la figura 22.

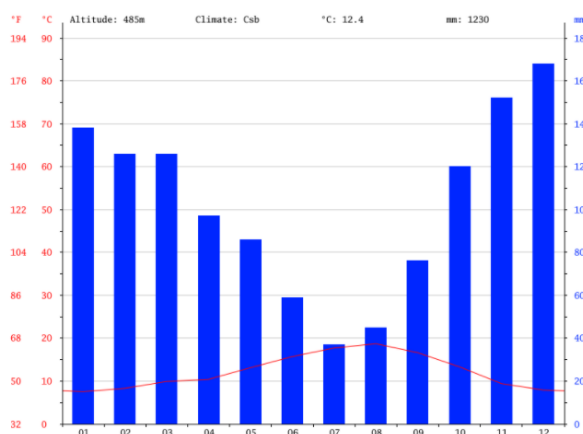


Figura 22: Climograma que recoge temperaturas y precipitaciones medias en Teixeira (36)

9. Descripción del proceso

El proceso seleccionado, como se ha indicado, se basa en la ruta de deshidrogenación directa de bioetanol a acetato de etilo obteniendo hidrógeno puro como subproducto, además de una pequeña cantidad de compuestos no deseados que serán destinados a una zona de almacenamiento para que una subcontrata gestione los residuos.

La corriente de alimentación fresca, proveniente de Bioetanol Galicia, es rica en bioetanol con un cierto contenido en impurezas de fermentación alcohólica; teniendo este aspecto bajo consideración se obtiene una corriente al 97.94 wt% en etanol mientras que el restante de las impurezas se puede considerar como acetaldehído. Posteriormente, la alimentación fresca se mezcla con la recirculación de etanol. Las condiciones de alimentación al reactor son 220 °C y 20 bar, valores de presión y temperatura que son óptimos desde un punto de vista termodinámico (*ver siguiente apartado*); puesto que se dispone de la alimentación en condiciones normales (presión atmosférica y temperatura ambiente) es necesario incluir equipamiento adicional, como una bomba centrífuga para subir la presión de la corriente líquida y un tren de intercambiadores de calor que suba la temperatura de la corriente hasta el valor deseado, evaporación mediante.

El reactor en el que se lleva a cabo la reacción es un reactor de lecho fijo multitubular donde los múltiples tubos están repletos de los pellets cilíndricos del catalizador de Cu/CuO/CuCr₂O₄ soportado en alúmina y utilizando como promotor cromato de bario. Este reactor se dispone de forma vertical, con los reactivos entrando por su parte inferior para así tener un contacto eficiente con un catalizador inmóvil (la fuerza de la gravedad es muchísimo mayor que el empuje hacia arriba que supone el régimen turbulento bajo, $Re < 6000$, de los gases que configuran la mezcla reaccionante) que acelera las reacciones, saliendo finalmente los productos de reacción por la parte superior.

Puesto que la reacción se desea llevar a cabo en un régimen óptimo a 220 °C es necesario un aporte externo de calor para compensar la moderada endotermicidad de la reacción global; por este motivo se dispone una carcasa alrededor de los tubos por donde circula un fluido térmico a elevada temperatura, que transmite parte de su calor de tal manera que la mezcla reaccionante se encuentra en unas condiciones que garantizan el funcionamiento óptimo del entramado catalítico. Es por lo tanto obvio indicar que entorno a esta carcasa es necesario incluir un aislante térmico comercial para evitar pérdidas de calor al exterior.

Los productos de reacción obtenidos han de separarse en sus diferentes categorías: producto deseado (acetato de etilo), reactivo no reaccionante (etanol), subproducto (hidrógeno gas) y residuos (acetaldehído remanente y acetaldol). Puesto que el hidrógeno es un gas en condiciones normales no es recomendable su introducción en el tren de columnas de destilación, de ahí que se prefiera su aislamiento en un

depósito flash situado antes de la propia sección de separación. Para ello, es necesario modificar las condiciones de la corriente de productos: la separación en el pre-flash se realiza a 25 bar y a temperatura ambiente (aprox. 35 °C), de tal manera que condensen todos los compuestos orgánicos a excepción del H₂, que se aísla sin mayor dificultad al salir por cabezas del tambor. La corriente de colas del flash se despresuriza hasta presión atmosférica por medio de una válvula de estrangulamiento; una vez se ha acondicionado la corriente de productos de reacción esta se dirige hacia la sección de separación.

El mayor problema de operación de toda la planta llega en este punto, puesto que los dos productos que se encuentran en mayor proporción forman un azeótropo a presión atmosférica (~ 1 bar), por lo que una destilación tradicional no bastará para acometer su separación. No obstante, aprovechando las propiedades prodigiosas del líquido iónico [emin][MeSO₃] esta separación no entraña mayor dificultad; de la columna de destilación extractiva sale por cabezas todo el acetato de etilo (LK) junto a la totalidad del acetaldehído (LNK), mientras que por colas fluye el etanol (HK), el acetaldol (HNK) y el líquido iónico (no-volátil). Con el fin de recuperar el *entrainer* y permitir una operación de destilación azeotrópica viable basta con usar un flash a vacío (empleando un eyector) para vaporizar los compuestos orgánicos; el hecho de utilizar un líquido iónico permite recuperar el *entrainer* con esta configuración sin la necesidad de recurrir a una columna de destilación.

El *entrainer*, recuperado por colas de este flash, se recircula y se vuelve a introducir por encima del plato de alimentación para optimizar el contacto con la corriente de productos de reacción. La corriente vaporizada de este depósito incluye el reactivo que no ha reaccionado en el primer paso por el reactor y el acetaldol formado como consecuencia de la reacción secundaria; para recircular el etanol es necesario purificarlo, con el fin de evitar la acumulación de otros subproductos en el sistema. Puesto que tienen volatilidades muy diferentes, el factor de separación propicia una destilación tradicional en pocas etapas que deriva en el acetaldol por colas (a almacenamiento para su posterior gestión como residuo) y el etanol por cabezas, que se recircula a la sección inicial del proceso.

Finalmente, hay que considerar la corriente de destilado de la columna de destilación extractiva, que como se ha indicado anteriormente contiene el acetato de etilo y el acetaldehído. Puesto que la pureza de esta corriente (aproximadamente del 96% en producto deseado) no cumple los requisitos del mercado, es necesario incluir una columna de purificación. Nuevamente aprovechando un factor de separación elevado la operación se acomete en pocas etapas, consiguiendo 50 000 t/año de acetato de etilo en una corriente al 99.8% de pureza.

9.1 Compuestos químicos

En los primeros puntos del apartado 3. *Acetato de etilo* se indicó información de carácter general acerca del producto sobre el cual diserta el presente documento, además de indicar las propiedades más importantes que rigen en cierto modo la estrategia seguida para su obtención. Una vez seleccionado de manera justificada el proceso industrial adoptado para su producción, se aporta esta misma información para el resto de sustancias químicas involucradas en el proceso.

9.1.1 Bioetanol

La molécula de bioetanol es idéntica a la de etanol, la única diferencia es la procedencia; así como este último procede de la industria petroquímica partiendo de la hidratación del etileno, el bioetanol procede de la fermentación alcohólica de los azúcares contenidos en la materia orgánica. Bajo condiciones normales, el etanol es un líquido transparente, volátil e inflamable. Su olor es agradable y característico, así como su sabor cuando se diluye de forma adecuada en agua (bebidas alcohólicas). Una de las propiedades más curiosas de este compuesto es la disminución de volumen cuando se mezcla en agua: una unidad de volumen de alcohol y otra de agua dan 1.92 unidades de volumen de mezcla (37).

Las propiedades físicas y químicas del etanol se deben principalmente a la presencia del grupo hidroxilo, ya que este grupo funcional proporciona polaridad a la molécula y da fuerza a los puentes de hidrógeno intermoleculares, lo que causa que el etanol en estado líquido se comporte como si estuviese fuertemente dimerizado. Es miscible en todas las proporciones con agua y con muchos otros disolventes orgánicos; es destacable también que el etanol anhidro sea higroscópico (38). En las tablas 6 y 7 se resumen sus principales propiedades físicas y termodinámicas respectivamente:

Tabla 6: Propiedades físicas del etanol/bioetanol (37)

Propiedades físicas	Valor
Temperatura de congelación (°C)	-114.10
Temperatura normal de ebullición (°C)	78.32
Temperatura crítica (°C)	243.10
Presión crítica (bar)	63.83
Volumen crítico (L/mol)	0.167
Tensión superficial (N/m)	0.023
Viscosidad (kg/m s)	0.0012
Solubilidad en agua	Miscible en todas las proporciones
Densidad (kg/m ³)	789.30
Conductividad térmica (W/m K)	0.17

Tabla 7: Algunas propiedades termodinámicas del etanol/ bioetanol (37)

Propiedades termodinámicas	Valor
Entalpía de vaporización (kJ/kg)	839.31
Entalpía de combustión (kJ/kg)	29676.69
Calor de fusión (kJ/kg)	104.6
Límite inferior de inflamabilidad (%vol)	4.3
Límite superior de inflamabilidad (%vol)	19.0
Temperatura de autoignición (°C)	423.0
Punto flash (°C)	14
Calor específico (kJ/kg °C)	2.42

En lo tocante a las propiedades químicas, la reactividad del etanol se basa principalmente -como ya se ha indicado- en la presencia del grupo hidroxilo: reacciones de deshidratación, deshidrogenación, oxidación y esterificación que se recogen de manera gráfica en la figura 23.

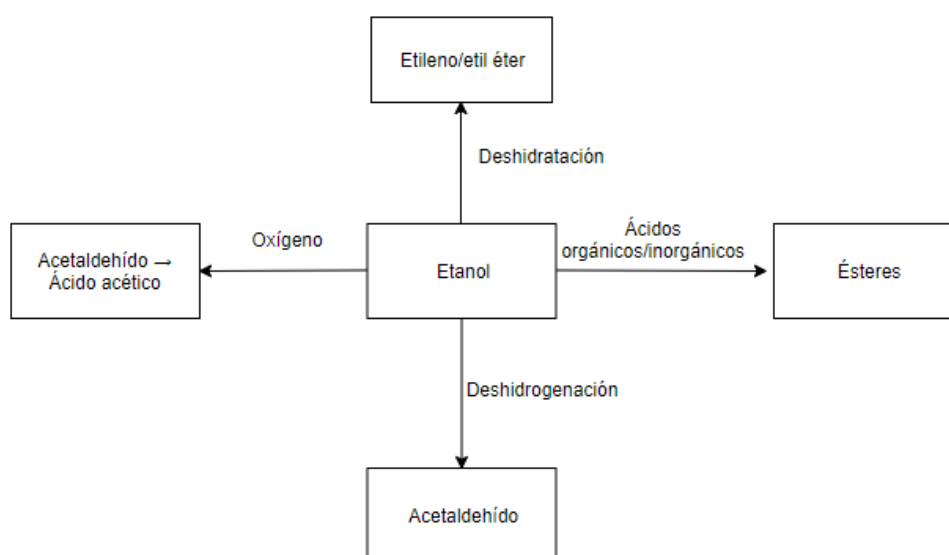


Figura 23: Cuadro de reactividad química del etanol (elaboración propia)

La producción de etanol siguiendo la ruta de fermentación alcohólica de materia orgánica (llamado bioetanol, pues) debe enfocarse hacia el proceso de obtención procedente de materias primas de segunda generación; el bioetanol de primera generación se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en caña, maíz, trigo y remolacha azucarera. Estos cultivos se destinan, como es lógico, a la alimentación humana por lo que si se destinan a la obtención de bioetanol los precios podrían incrementar puesto que la oferta sería más pequeña (39).

El objetivo de los procesos de 2ª generación es conseguir un proceso altamente sostenible partiendo de partes residuales de alimentos (tallos, hojas, mazorcas) que han sido descartadas una vez se extrae el propio cultivo alimenticio. También se

pueden emplear residuos municipales, biogás o los licores negros procedentes del proceso Kraft³ destinado a la obtención de papel. Se debe considerar el correcto uso de la tierra, las industrias de biomasa ya existentes y las tecnologías de conversión relevantes al evaluar la idoneidad del desarrollo de estos compuestos como materia prima para la obtención de bioetanol.

El principal problema a la hora de desarrollar las tecnologías necesarias consiste en la extracción de las materias útiles de la biomasa, donde los azúcares que experimentan los procesos fermentativos están atrapados dentro de lignina, hemicelulosa y celulosa, que son carbohidratos complejos, siendo necesarias enzimas, calentamiento con vapor u otros pretratamientos para aislar la materia útil. En la actualidad existen técnicas diversas con tal fin, como la gasificación, pirólisis y rutas bioquímicas, entre muchas otras.

9.1.2 Acetaldehído

El acetaldehído fue observado por primera vez en 1774 por Scheele durante la reacción entre el dióxido de manganeso y ácido sulfúrico en matriz alcohólica. No obstante, su obtención no fue explicada hasta 60 años después por Liessig, quien preparó deliberadamente este compuesto puro a través de una oxidación de etanol con ácido crómico; le otorgó el nombre de aldehído, una especie de contracción de “alcohol deshidrogenado” (40).

En condiciones normales, es un líquido poco viscoso, de bajo punto de ebullición, altamente inflamable y con un olor desagradable, que es miscible en todas las proporciones con agua y con la mayor parte de los disolventes orgánicos de uso más común. La primera vez que este compuesto químico fue utilizado de manera extensiva coincidió con el periodo marcado por la 1ª Guerra Mundial, como punto de partida para la obtención de acetona a partir de ácido acético (41). Sus propiedades físicas y termodinámicas más destacadas se recogen en las tablas 8 y 9 respectivamente:

Tabla 8: Propiedades físicas características del acetaldehído (41)

Propiedades físicas	Valor
Peso molecular (g/mol)	44.05
Temperatura fusión (°C)	-123.5
Temperatura ebullición (°C)	20.16
Densidad (kg/m ³)	778.0
Densidad vapor (aire=1)	1.33
Tensión superficial (N/m)	0.021
Temperatura crítica (°C)	181.5
Presión crítica (bar)	640
C _p /C _v	1.14

³ Catalyst Paper. *How we make Kraft Pulp*. [En línea] Disponible online en: <https://bit.ly/2M5nEHQ>

Tabla 9: Propiedades termodinámicas del acetaldehído (41)

Propiedades termodinámicas	Valor
Calor específico (kJ/kg K)	1.41
Calor latente fusión (kJ/mol)	3.24
Calor latente vaporización (kJ/mol)	25.71
Calor de disolución en agua (kJ/mol)	-6.82
Entalpía de combustión (kJ/mol)	12867.9
Calor de formación a 0°C (kJ/mol)	-165.48
Punto flash (°C)	-38
Temperatura de autoignición (°C)	165
Límite inferior de inflamabilidad en aire (%vol)	4.5
Límite superior de inflamabilidad en aire (%vol)	60.5

En términos de producción, se tiene constancia de que al comienzo de la última década del siglo XX, el 98% del acetaldehído producido a escala mundial se obtenía mediante el proceso Wacker-Hoechst, en el cual se profundizó ampliamente en el apartado 5.3 *Proceso Wacker-Hoechst + Reacción de Tishchenko* (41).

Debido a su alta reactividad química, hoy en día sigue siendo un importante intermedio en la producción de acetato de etilo, ácido acético, anhídrido acético y piridinas entre muchos otros compuestos. Presenta la reactividad típica tanto de los aldehídos como de los compuestos que tienen un grupo alquilo en el que los átomos de hidrógeno son activados por el grupo carbonilo en la posición α ; al ser calentado por encima de 420 °C se descompone térmicamente en metano y monóxido de carbono (40). Sus propiedades químicas se resumen en el cuadro de reactividad presentado en la figura 24.

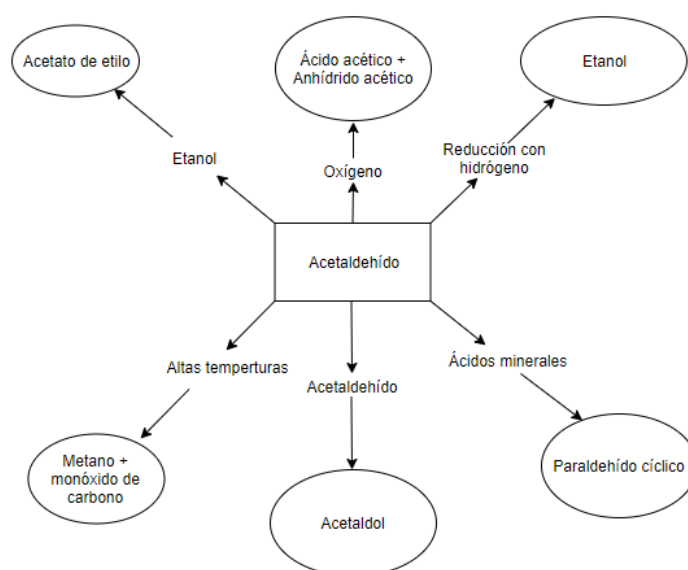


Figura 24: Propiedades químicas (reactividad) del acetaldehído (elaboración propia)

9.1.3 Hidrógeno

Los primeros indicios de existencia del hidrógeno gas datan de comienzos del siglo XVI, cuando el alquimista suizo Paracelso percibió la existencia de un gas al hacer reaccionar hierro con sulfato. En el siglo siguiente, Turquet de Mayerne constató que este gas era inflamable. Sin embargo, no sería identificado hasta mediados del siglo XVIII, con los experimentos llevados a cabo por Boyle. Finalmente, en 1785 el padre de la Química moderna, Antoine Lavoisier, consiguió la separación de agua en hidrógeno y oxígeno en un tubo de cobre calentado; fue esta eminencia quien además le dio el nombre de hidrógeno a este gas inflamable (42).

Es el primer elemento de la tabla periódica, con una configuración electrónica de $1s^1$, aunque el número de protones puede variar, de tal manera que presenta tres isótopos: protio, deuterio y tritio (inestable). La diferencia relativa en la cantidad de materia presente es tan grande que las propiedades físicas y cinéticas varían de manera considerable. Además de presentar comportamiento isotópico, el H_2 está presente en dos formas según el spin nuclear de ambos átomos en la molécula: orto y para hidrógeno, siendo ambas formas interconvertibles entre ellas encontrándose en equilibrio. En condiciones normales es un gas incoloro, no venenoso, sin olor y sin sabor, altamente inflamable. En la tabla 10 se recogen sus propiedades físicas más destacadas:

Tabla 10: Propiedades físicas del hidrógeno gas en condiciones normales (42)

Propiedades físicas	Valor
Peso molecular (g/mol)	2.02
Temperatura crítica (°C)	-240.17
Presión crítica (bar)	0.073
Temperatura ebullición (°C)	-252.76
Densidad como vapor (kg/m ³)	0.090
Viscosidad (kg/m s)	8.34×10^{-6}
Conductividad térmica (W/m K)	174×10^{-3}

Finalmente, también se recogen algunas propiedades termodinámicas de interés en la tabla 11:

Tabla 11: Propiedades termodinámicas del hidrógeno gas (42)

Propiedades termodinámicas	Valor
Calor específico (kJ/kg K)	24.60
Temperatura de autoignición (°C)	560
Límite inferior inflamabilidad (%vol en aire)	4
Límite superior inflamabilidad (%vol en aire)	77
Entalpía de vaporización (kJ/kg)	445.6
Temperatura de llama adiabática (°C)	2045

9.1.4 Acetaldol

El acetaldol, producto de la reacción entre dos moléculas de acetaldehído, es un líquido ligeramente viscoso de color blanco amarillento. Es el compuesto aldólico por excelencia (un aldehído con un grupo alcohol), siendo conocido también como 3-hidroxibutanal, que se utilizaba anteriormente como un compuesto sedante en términos médicos. Es más denso que el agua, y el contacto con la piel y los ojos puede causar irritación, siendo moderadamente tóxico también por ingestión e inhalación. Es soluble en agua y miscible en todos los disolventes orgánicos. Sus vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire (43).

En la planta de producción de acetato de etilo es el residuo generado como resultado de la reacción secundaria; puesto que su selectividad es inferior al 2%, las cantidades relativas de acetaldol a lo largo de las conducciones son muy bajas. No obstante, hay que tener cierta prudencia en tanto a que a presiones y temperaturas elevadas puede presentar comportamiento inestable, pudiendo incluso producirse el fenómeno de ignición si hay alguna fuente cercana en forma de chispa. En la tabla 12 se recogen sus propiedades más importantes.

Tabla 12: Propiedades físicas y termodinámicas del acetaldol [43, Hysys]

Propiedades	Valor
Masa molecular (g/mol)	88.11
Densidad (kg/m ³)	1096
Tensión superficial (N/m)	4.114
Viscosidad (kg/m s)	6.69x10 ⁻⁴
Conductividad térmica (W/m K)	0.16
Temperatura de ebullición (°C)	170.4
Punto flash (°C)	65.55
Calor específico (kJ/kg K)	2.197
Calor de vaporización (kJ/kg)	465.4
Temperatura de autoignición (°C)	250

9.1.5 Fluido térmico: Dowtherm Q

Dowtherm Q es el nombre comercial de un fluido térmico (*heat transfer fluid*) comercializado por la casa Dow Chemical, consistente en una mezcla de difeniletano y compuestos aromáticos alquilados, destinado a sustituir los aceites calientes en sistemas de transmisión de calor en fase líquida en un rango de temperaturas de entre -35°C y 350°C. Presenta una estabilidad térmica mayor que la de los aceites calientes, particularmente notable en el rango superior de utilización, por encima de 250°C, correspondiente con la casuística presentada en el reactor.

Además, sus valores de viscosidad son muy pequeños en comparación con otros fluidos térmicos similares, lo que provoca que los costes de un bombeo utilizando

equipos de impulsión como centrífugas se vean significativamente reducidos; asimismo, gracias a estos bajos valores de viscosidad el coeficiente efectivo de transmisión de calor es mucho mayor, lo que deriva en una operación hasta un 42% más eficiente que utilizando fluidos térmicos tradicionales. Finalmente es importante destacar sus características poco corrosivas con los materiales ingenieriles de uso frecuente lo que asegura su compatibilidad con la mayoría de los sistemas de transmisión de calor.

Las consideraciones de seguridad más importantes a tener en cuenta al tratar fluidos térmicos basados en compuestos orgánicos son relativas a que este tipo de compuestos son susceptibles de desarrollar reacciones de oxidación con aire a temperaturas elevadas. El grado de oxidación y la velocidad de reacción dependen de la temperatura y de la concentración de oxígeno; los subproductos no deseados incluyen normalmente ácidos carboxílicos que causan problemas operativos. Es necesario por tanto tomar medidas preventivas para asegurarse de que el aire es eliminado del sistema antes de calentar el fluido térmico.

En cuestiones de flamabilidad, a pesar de ser un compuesto combustible la alta temperatura de autoignición (100°C por encima del rango superior de operación) genera un margen de seguridad que tiene en cuenta posibles incrementos de temperatura que se pueden dar debido a fallos operacionales. Los vapores de Dowtherm Q tampoco suponen un riesgo de inflamabilidad a temperatura ambiente ya que la concentración de saturación se encuentra bien alejada del límite inferior de inflamabilidad. Por último, se destaca que no se puede descargar este fluido térmico a aguas públicas. Toda la información aportada en este punto ha sido extraída de la hoja técnica del producto proporcionada por la casa comercial (44), al igual que las tablas 13 y 14 que se adjuntan a continuación donde se recogen las propiedades físicas y termodinámicas más importantes del fluido térmico. Aquellas propiedades que dependen de la temperatura se listan a la temperatura óptima de operación del reactor, 220°C.

Tabla 13: Propiedades físicas del fluido térmico Dowtherm Q (44)

Propiedad física	Valor
Peso molecular (g/mol)	190
Temperatura crítica (°C)	489
Presión crítica (bar)	24
Volumen crítico (l/kg)	3.26
C_p/C_v	1.03
Densidad (kg/m ³)	814.20
Conductividad térmica (W/m K)	0.094
Viscosidad (kg/m s)	0.00027
Presión vapor (bar)	0.31

Tabla 14: Propiedades termodinámicas del fluido térmico utilizado en planta (44)

Propiedad termodinámica	Valor
Rango temperaturas (°C)	Desde -35 hasta 350
Flash point (°C)	120
Temperatura de autoignición (°C)	412
Límite de inflamabilidad inferior en aire (°C)	135 (0.55 %vol)
Límite de inflamabilidad superior en aire (°C)	190 (5.5% vol)
Calor específico (kJ/kg K)	2.27
Entalpía vaporización (kJ/kg)	285.70

9.1.6 Líquido iónico: metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio

El líquido iónico utilizado para romper el azeótropo acetato de etilo-etanol a presión atmosférica es metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio (30). A temperatura ambiente, se trata de un sólido de bajo punto de fusión (aproximadamente 30°C) con un color definido entre el amarillo y el naranja. Es completamente miscible en agua así como en disolventes orgánicos de uso habitual, como la acetona, el isopropanol o el tolueno; sin embargo, es inmiscible en hexano. La temperatura de uso en la columna de destilación azeotrópica T-401 es aproximadamente de 40°C, por lo que su estado en estas condiciones es de líquido, constituido íntegramente por los iones 1-etil-3-metilimidazolio y metanosulfonato presentados en la figura 25.

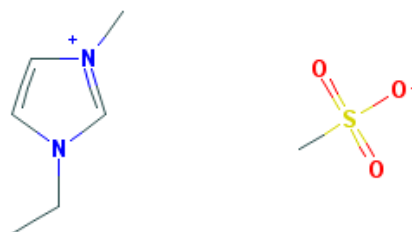


Figura 25: Estructura molecular del líquido iónico, explicitando el catión y el anión

El número de registro del metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio en el CASRN (*Chemical Abstract Service registry number*) es 145022-45-3. Sus propiedades más destacadas se recogen en la tabla 15.

Tabla 15: Algunas propiedades del metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio

Parámetro	Valor
Masa molecular (kg/kmol)	206.07
Densidad (kg/m ³)	1240
Calor específico (kJ/kg K)	1.67
Viscosidad (kg/m s)	0.13
Conductividad eléctrica (mS/cm)	3.69
Tensión superficial (N/m)	0.07
Índice de refracción	1.54

9.1.7 Corrientes auxiliares

En el diagrama de instrumentación y tuberías (*P&ID diagram*) se hace mención a algunas corrientes de servicio empleando terminología específica (45), la cual se explicita a continuación:

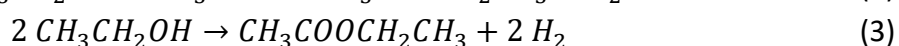
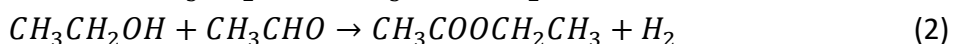
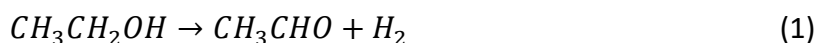
- *hps (high pressure steam)*: vapor de alta presión (40 bar aproximadamente) que se emplea como medio calefactor a una temperatura de 250°C.
- *mps (medium pressure steam)*: vapor de media presión (15.5 bar aproximadamente) que se emplea como medio calefactor a una temperatura de 200 °C.
- *lps (low pressure steam)*: vapor de baja presión (2 bar aproximadamente) que se emplea como medio calefactor a una temperatura de 120°C.
- *bwh (boiled water high pressure)*: salida/retorno de los intercambiadores de calor que emplean vapor de alta presión como fluido de servicio.
- *bwm (boiled water medium pressure)*: salida de los intercambiadores de calor que emplean vapor de media presión como fluido calefactor.
- *bwl (boiled water low pressure)*: salida de los intercambiadores de calor que emplean como fluido de calefacción vapor de baja presión.
- *cws (cooling water supply)*: agua de enfriamiento de la que se dispone de forma natural a 25°C.
- *cwr (cooling water return)*: salida del agua de enfriamiento tras el proceso de transmisión de calor a una temperatura máxima de 45°C con el fin de no dañar el ecosistema de procedencia.
- *rws (refrigerated water supply)*: suministro de agua de refrigeración a 10°C de la que se dispone tras un ciclo de refrigeración con propano-propileno.
- *rwr (refrigerated water return)*: retorno del agua refrigerada a la salida del intercambiador de calor a una temperatura máxima de 15°C.
- *dtq (dowtherm q)*: circuito cerrado de fluido calefactor a alta temperatura que se emplea con el propósito de aumentar el aceite térmico que circula a través de la carcasa del reactor.

9.2 Condiciones óptimas de operación: estudio termodinámico

La reacción de deshidrogenación de etanol se ha utilizado de manera tradicional para la obtención de acetaldehído a nivel industrial, llevando a cabo esta ruta a presiones bajas. No obstante, según los estudios de Inui et al. (46) se pudo demostrar que empleando las condiciones óptimas de operación (en términos de presión, temperatura y tiempo de residencia) el equilibrio de reacción podría desplazarse hacia la producción de acetato de etilo, aprovechando el acetaldehído como intermedio con el fin de obtener el producto deseado de reacción. El desplazamiento de este equilibrio no es tan fácil como pudiera parecer dado que existe un amplísimo esquema de reacciones colaterales, entre las cuales destaca la autocondensación del acetaldehído.

Por este motivo, se realiza un análisis termodinámico de la reacción de deshidrogenación a acetato de etilo aplicando el método de minimización de la energía libre de Gibbs. En este apartado se indica un pequeño resumen del trabajo realizado en la Tesis Doctoral de G. Carotenuto, ya que no es objeto del presente documento realizar un estudio profundo de la base termodinámica involucrada en la reacción; si se desea acudir a la fuente original basta con acudir a la referencia (16).

Siguiendo el método de minimización de la energía libre de Gibbs es posible determinar la composición en el equilibrio para cada sistema reactivo a una presión y temperatura dadas. La reacción de deshidrogenación puede ser entendida como dos pasos intermedios que derivan en una reacción global, respetando los criterios estequiométricos: deshidrogenación de etanol a acetaldehído y reacción de este acetaldehído con el etanol no reaccionado para dar lugar a acetato de etilo; juntando estas dos reacciones se dispone de la reacción global, en la que el etanol se deshidrogena de manera directa para dar lugar a acetato de etilo e hidrógeno como subproducto.



Para cada reacción, la constante de equilibrio en condiciones estándar, K_{ei} , ha sido evaluada considerando la energía de Gibbs según:

$$\ln K_{ei} = \frac{-\Delta G^0}{R \cdot T} \quad (4)$$

Las energías libres de Gibbs de las sustancias puras en condiciones estándar se recogen en la tabla 16:

Tabla 16: Energías de Gibbs necesarias para el cálculo de las constantes de equilibrio de reacción (ChemCAD)

Compuesto	ΔG_f^0 (kJ/mol)
Etanol	-167.74
Acetaldehído	-128.83
Acetato de etilo	-327.77
Hidrógeno	0

Con el fin de evaluar la constante de equilibrio a diferentes temperaturas (es menos sensible a los cambios de presión) se recurre a la ecuación de Van't Hoff que también involucra la entalpía de reacción a partir de las entalpías de formación de reactivos y productos, relacionados con sus correspondientes coeficientes estequiométricos:

$$\ln \frac{K_{ei}(T_2)}{K_{ei}(T_1)} = \frac{-\Delta H_r^0}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (5)$$

Basándose en la ecuación de Van't Hoff no hay problema para, a diferentes temperaturas, obtener diferentes valores para la constante de equilibrio con el fin de desarrollar una correlación entre ambas variables: en este punto es comprueba fácilmente que para las reacciones endotérmicas la constante de equilibrio crece con la temperatura mientras que para las reacciones exotérmicas ocurre un comportamiento contrario. Esta conclusión no entra en conflicto con el Principio de Le Chatelier; no obstante, se pueden obtener conclusiones más profundas: la primera reacción de deshidrogenación a acetaldehído, endotérmica, se ve favorecida a temperaturas superiores a 300°C, mientras que la segunda, reacción combinada entre etanol y acetaldehído, exotérmica, se ve favorecida a temperaturas bajas.

La reacción global es moderadamente endotérmica, por lo que para favorecer la producción de acetato de etilo la reacción de deshidrogenación a temperaturas inferiores a 300° C, lo cual coincide con la información experimental de la que se dispone hasta la fecha. Por este motivo se considera que la relación K_e v. T obtenida es válida y coherente, pudiendo ser utilizada en el desarrollo de las leyes cinéticas para el diseño del reactor.

Para evaluar las constantes de equilibrio de las dos reacciones que conforman la global se minimiza la energía libre de Gibbs con el propósito de determinar las composiciones en el equilibrio. Asimismo, las constantes de equilibrio de la fase gas han sido estimadas teniendo en cuenta los efectos de la presión y la condición de no-idealidad de la mezcla gaseosa utilizando el modelo basado en ecuaciones de estado PSRK:

$$\min n \cdot G = \sum n_i \cdot \Delta G_i^0 + \sum R \cdot T \cdot \ln P + \sum n_i \cdot R \cdot T \cdot \ln \varphi_i \quad (6)$$

aplicado a todos los compuestos químicos que en algún momento se vean involucrados en la mezcla reaccionante; se debe mantener además constante la temperatura y presión de reacción aplicando la siguiente condición frontera:

$$\sum n_i a_{ji} = b_j \quad (7)$$

Para resolver esta función objetivo sujeta a esta restricción se recurre al modelo PSRK, que no es más que un método de estimación para el cálculo de equilibrios de fase de mezclas no ideales de compuestos químicos; para obtener las presiones parciales se ha establecido una relación entre el flujo de cada componente, el flujo total y la presión total de operación en el reactor:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum F_i} \cdot P_{Total} \quad (8)$$

Es importante además especificar que la reacción secundaria de autocondensación del acetaldehído fue despreciada (a consecuencia de su baja selectividad) y que se ha considerado una reacción homogénea en fase gas, cuando en verdad se trata de un sistema heterogéneo entre dos fases: la fase gaseosa que constituye la mezcla reaccionante y el catalizador sólido; es por este motivo por el que también se

despreciaron los pasos de adsorción-desorción en el cálculo de los equilibrios de fase, lo cual puede contribuir a la aparición de error entre los datos calculados por este método y los datos experimentales obtenidos.

La conversión del etanol y la selectividad de cada uno de los compuestos fue evaluada en base a las consideraciones termodinámicas presentadas en este apartado. Los perfiles de fracción molar a una presión constante de 20 bar son presentados en la figura 26.

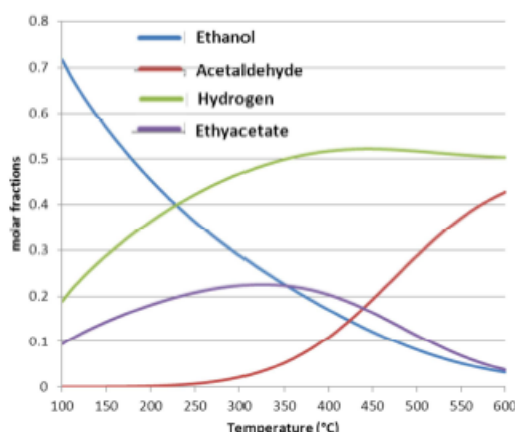


Figura 26: Perfil de composición molar en el equilibrio ($P=20$ bar) para diferentes temperaturas (16)

Se puede observar que mediante el incremento de temperatura aumenta de manera notable la conversión del etanol, dado que la fracción molar de etanol en los productos de reacción a 600 °C es prácticamente nula. En la ya mencionada figura se puede asimismo observar el importante efecto de la temperatura en las selectividades para el producto deseado de reacción: para maximizar la producción de acetato de etilo es vital trabajar en un rango de temperaturas de entre 200 y 300 °C; incrementando la temperatura de reacción vemos que hay un máximo del producto deseado alrededor de 350 °C, convirtiéndose después el acetaldehído en el compuesto principal de reacción. El perfil de selectividades, no obstante, se percibe de manera más nítida en la figura 27.

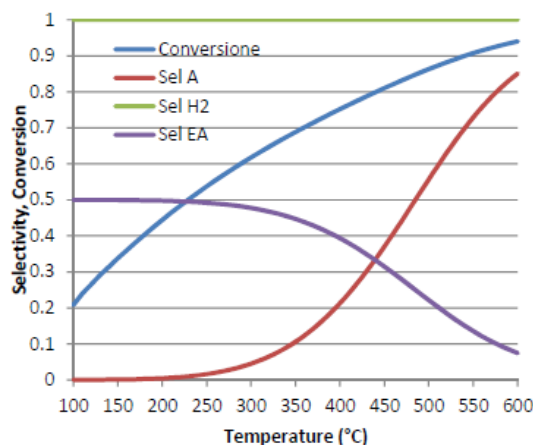


Figura 27: Perfil de selectividades ($P=20$ bar) obtenido a diferentes temperaturas (16)

Fijándose únicamente en el perfil de selectividades del producto deseado de reacción y teniendo en cuenta que no se considera el balance de carbonos (por lo que la selectividad es el doble, ya que una molécula de acetato de etilo tiene el doble de C que una de bioetanol) la máxima selectividad se obtiene en el rango de temperaturas situado entre 200-260°C.

Hablando en términos de presión, un cambio en esta magnitud no afecta de manera fuerte a la conversión, pero sí que influye enormemente en la selectividad, tal y como se puede constatar en la siguiente figura. Es por este motivo por el que se prefiere trabajar a presiones elevadas, ya que el equilibrio de reacción se desplaza de manera muy significativa hacia la producción del acetato de etilo. No obstante, como refleja la figura 28, se ve que el incremento de 20 a 30 bar apenas se traduce en mayor selectividad, por lo que no es recomendable trabajar a presiones muy altas optando así por una operación a una presión moderada.

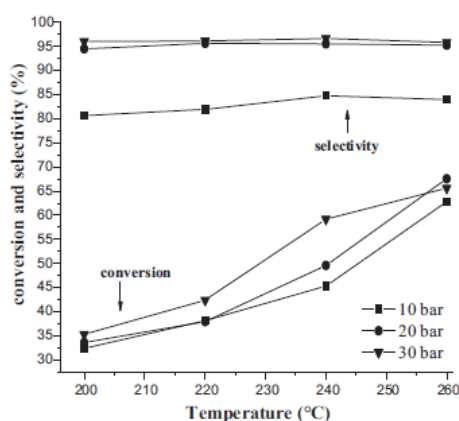


Figura 28: Relación de P y T con la conversión de EtOH y la selectividad en EA (20)

Una vez obtenidas de manera teórica las curvas de equilibrio, la conversión de etanol y la selectividad en acetato de etilo mediante la minimización de la energía libre de Gibbs, se comparan los resultados experimentales con los datos calculados para cotejar la validez de los mismos; los perfiles teóricos de selectividad, conversión y composiciones están en sintonía con la información proporcionada por la literatura. No obstante, las composiciones teóricas en el equilibrio predichos por el método de estimación PRSK no coinciden con los datos experimentales, ya que la producción de acetaldehído también se lleva a cabo a bajas temperaturas (a pesar de ser una reacción endotérmica) para tiempos de residencia pequeños. No obstante, el modelo ha predicho que en el rango de temperatura bajas (100-300°C) el acetato de etilo es el producto principal y que la selectividad en acetaldehído es extremadamente baja.

Estas dos consideraciones están en contradicción directa tanto con los resultados experimentales como con la información que proporciona la bibliografía, y se puede explicar con la competitividad existente en la deshidrogenación para dar tanto

acetaldehído como acetato de etilo. Termodinámicamente el equilibrio está más desplazado hacia la producción de acetaldehído a temperaturas superiores a 340°C si en la minimización de la energía libre de Gibbs se asume un tiempo de residencia infinito, lo cual no es cierto, y por lo tanto la selectividad en acetaldehído es más baja que la predicha por el modelo, ya que parte se destina a la obtención de acetato de etilo mediante la reacción con el etanol en exceso.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se concluye el estudio termodinámico incluyendo un pequeño análisis sobre la influencia del tiempo de residencia: a tiempos de residencia bajos (expresando el tiempo de residencia como W/F , siendo W la masa de catalizador en kg y F el flujo de alimentación de etanol al reactor en kmol/h) la conversión de etanol está lejos de la obtenida en el equilibrio, impuesta por restricciones termodinámicas. A tiempos de residencia más elevados (en torno a 100 kg/h kmol) la conversión de etanol incluso supera la del equilibrio teórico, lo cual se puede explicar por las numerosas aproximaciones llevadas a cabo en el estudio: la reacción es mucho más compleja de lo que se ha asumido (heterogénea gas-sólido), siendo importantes los fenómenos de adsorción-desorción y las reacciones secundarias podrían tener una cierta influencia en el equilibrio. Asimismo, la selectividad en acetaldehído a tiempos de residencia bajos está mucho más favorecida que a tiempos de residencia elevados, lo cual concuerda con las conclusiones del estudio.

A modo de resumen, este estudio termodinámico a alta temperatura y presión sugiere la forma de maximizar el producto deseado de reacción escogiendo las condiciones óptimas de operación. Una conversión del 100% de etanol se conseguiría a una temperatura de unos 600°C, pero la selectividad en acetaldehído sería muy grande. Bajo esta consideración, para favorecer la formación de acetato de etilo hay que trabajar en unas temperaturas de entre 220-240°C. La presión también es importante, no tanto en la conversión del etanol, pero sí en el incremento de selectividad en el producto deseado, favoreciendo además presiones bajas la formación de acetaldehído. Comparando los datos experimentales con los teóricos, se encuentra que los datos obtenidos en laboratorio superan las conversiones del equilibrio, lo cual se justifica teniendo en cuenta las simplificaciones que se han realizado. No obstante, se ha encontrado una buena correlación a altos tiempos de residencia (superiores a 50 kg h/kmol) entre las selectividad teóricas y experimentales en acetato y acetaldehído. Se justifica, por todo esto, que las condiciones ideales de operación oscilan entre 220-240°C, 20 bar y con altos tiempos de residencia, pudiendo obtener así valores de conversión cercanos al 65% y de selectividad en acetato superiores al 98%; estas suposiciones se cotejarán en el estudio cinético previo al diseño riguroso del reactor.

10. Descripción de la instalación

El objetivo de este apartado en la memoria es describir cada una de las unidades presentes en la planta de proceso, aportando información acerca de su función principal y sus características más importantes. La planta se divide en 4 secciones que se corresponden con bloques donde se acondiciona la alimentación al reactor, tiene lugar la reacción, se acondicionan los productos de reacción y finalmente se separan estos, consiguiendo el producto con una elevada pureza y el reactivo no reaccionante con el fin de reciclarlo a la primera sección.

10.1 Sección 100: acondicionamiento de los reactivos

En la sección 100 se sitúa el equipamiento encargado de modificar las condiciones de presión y temperatura de la corriente de entrada al proceso, originalmente a presión atmosférica y temperatura ambiente procedente de la planta de Bioetanol Galicia situada a 500 m de la parcela donde se tiene previsto llevar a cabo el emplazamiento. En esta sección también se produce la mezcla de la alimentación fresca con el etanol que proviene de la corriente de recirculación.

La corriente de alimentación fresca al 97.94 wt% en bioetanol siendo las impurezas el principal subproducto de la fermentación -acetaldehído- se almacena como líquido en depósitos cilíndricos que actúan como tanques de almacenamiento para garantizar el funcionamiento de la planta asegurando el suministro de su *feedstock* a pesar de que se produzcan problemas en la planta de producción de bioetanol. Una vez se ha mezclado con la corriente de ciclo (consistente en bioetanol puro) se presuriza hasta la presión de operación del reactor, empleando una bomba centrífuga P-101 A/B; puesto que es una etapa crítica del proceso se colocan dos en paralelo, una de repuesto, para que en el caso de averías el proceso pueda continuar funcionando.

La alimentación líquida a 20 bar tiene una temperatura inferior a 50°C, por lo que su condición termodinámica es de líquido subenfriado. Con el fin de aumentar su condición térmica hasta la temperatura óptima de reacción, se emplean 3 intercambiadores de calor diferentes debido a los múltiples regímenes existentes cuando se trabaja con flujo bifásico (30): el E-101 -carcasa y tubos- se utiliza para transmitir calor sensible de tal manera que se alcanza el punto de burbuja (condición de líquido saturado) con vapor de agua de media presión como fluido de servicio, el E-102 -evaporador tipo kettle- se usa para transmitir calor latente de tal manera que se vaporiza la alimentación (paso de líquido saturado a vapor saturado) utilizando también mps como fluido de transmisión de calor, con una fuerza impulsora máxima (diferencia de temperatura entre la entrada y la salida) de 10°C para asegurar el fenómeno de ebullición nucleada y así evitar la indeseada ebullición pelicular. Finalmente, el E-103 -carcasa y tubos- se emplea para sobrecalentar el vapor hasta la temperatura óptima de operación (220°C), con vapor de alta presión como fluido de servicio.

10.2 Sección 200: zona de reacción

La corriente de alimentación tras su acondicionamiento en la sección 100 se dirige a la siguiente zona de la planta de proceso, donde tiene lugar la reacción química a 20 bar y una temperatura óptima de 220°C. Puesto que la reacción global es endotérmica, es necesario añadir un fluido calefactor que circulará entorno a los lechos empacados de catalizador (*Multitubular Packed Bed Reactor*) en una carcasa, pudiendo compararse la geometría del reactor R-201 con la de un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Puesto que el área de intercambio de calor viene delimitada por la masa de catalizador necesaria para conseguir la conversión y la selectividad esperadas y el fluido térmico no pierde mucha temperatura en el proceso de transmisión de calor, se opta por una configuración en flujo paralelo (la configuración a contracorriente, más habitual a nivel industrial no es necesaria en este caso, además de suponer una barrera al resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que modeliza matemáticamente el comportamiento del reactor).

El fluido térmico circulará en circuito cerrado incluyendo un intercambiador de calor de carcasa y tubos E-201 cuyo fluido de servicio es el mismo aceite térmico a mayor temperatura, con la finalidad de conseguir que el aceite calefactor entre al reactor a la temperatura adecuada para garantizar un funcionamiento óptimo del mismo.

10.3 Sección 300: acondicionamiento de los productos de reacción

Puesto que la mezcla reaccionante circula a través de los tubos que están llenos de gránulos de catalizador, se produce una caída de presión causada por este flujo a través de un lecho poroso. Para poder posibilitar el aislamiento del hidrógeno gas en un depósito flash es necesario modificar las condiciones de presión de la corriente de productos; en el estudio termodinámico del funcionamiento del flash en el simulador HYSYS se infiere que la separación es más efectiva cuanto mayor sea la presión, de ahí que sea necesario incorporar un compresor K-301, que aumenta la presión de la corriente de salida del reactor hasta 25 bar. Los productos de reacción se enfrían hasta 35°C en el E-301 -carcasa y tubos- utilizando como fluido de servicio agua de enfriamiento (*cooling water, cw*), de tal manera que se dispone de todas las sustancias orgánicas (etanol, acetaldehído, acetato de etilo y acetaldol) en fase líquida, posibilitando la separación del hidrógeno gas en el depósito flash V-301. Se supone separación ideal como se demuestra en los cálculos justificativos.

La corriente de colas de este tanque se despresuriza hasta alcanzar presión atmosférica empleando la válvula de estrangulamiento VLV-301, ya que el uso de una turbina recuperadora de presión no se justifica por cuestiones heurísticas: la potencia que se puede recuperar no es superior a 10 Hp, siendo factible la instalación de este tipo de equipamiento cuando la caída de presión supera los 150 Hp teóricos (45).

10.4 Sección 400: zona de separación

En la columna de destilación extractiva T-401 se introduce la corriente procedente de la sección 300 en el plato de alimentación y unas etapas por encima el *entrainer*, el líquido iónico [emim][MeSO₃], que arrastra al HK y al HNK por colas mientras que el acetato de etilo y el acetaldehído salen por cabezas. La corriente de colas de la T-401, que contiene el líquido iónico, acetaldol y etanol en estado de líquido saturado con la temperatura de saturación de la mezcla orgánica se lleva a vacío (0.5 bar) utilizando la válvula de estrangulamiento VLV-401 y un eyector en conjunción con el depósito flash V-401, donde se vaporiza el etanol y el acetaldol y por colas circula el líquido iónico no volátil, siendo bombeado en una corriente de reciclo a cabezas de la T-401 utilizando un elemento de impulsión (bomba centrífuga P-402).

La corriente rica en etanol se enfría hasta su punto de burbuja (líquido saturado) en el E-401 -carcasa y tubos- empleando como fluido calefactor agua de enfriamiento (cw) y se lleva a presión atmosférica utilizando la bomba centrífuga P-401 para ser alimentada a la torre de purificación T-402 (operando en condición atmosférica), donde se sigue una destilación tradicional en pocas etapas, consiguiendo etanol puro por cabezas para su recirculación a la sección 100 empleando la bomba centrífuga P-403; la corriente de colas, compuesta íntegramente por acetaldol, se dirige a tratamiento de aguas. Volviendo al destilado de la T-401, esta corriente se dirige a la columna de purificación T-403 con la bomba centrífuga P-404, donde en pocas etapas se consigue separar el acetaldehído -saldrá por cabezas- del acetato de etilo, cuya producción horaria coincide con la establecida para conseguir 50000 t/año (en una corriente de una pureza superior al 99.8%) suponiendo una operación de 24 h/día durante 330 días.

10.5 Otras secciones

Lindando con la sección destinada a los tanques de almacenamiento de materias primas y productos se encuentra la zona de utilidades, donde se sitúan los edificios para su obtención, como vapor de baja y alta presión, agua de refrigeración o aire de instrumentación para operar los lazos de control, además de posibles transformadores para hacer una gestión eficiente de la energía eléctrica.

Además, también hay que contemplar la necesidad de una zona de oficinas, sala de control, laboratorio de análisis y aparcamiento para los empleados de la planta de producción. Las directrices teóricas versan acerca de separar lo máximo posible al personal de oficina de la zona de proceso para minimizar los daños en caso de contingencia (accidente), así como situar la zona de aparcamiento lo más próxima posible a uno de los accesos a la planta para optimizar una potencial evacuación. Para finalizar, la sala de control y los laboratorios analíticos lógicamente se encuentran cerca de la zona de producción, pero con una disposición relativa alejada de las unidades más peligrosas (por ejemplo, columnas cromatográficas que trabajen a presión elevada o equipamiento muy caro).

11. Control e instrumentación

En este apartado de la memoria se realizará primeramente una introducción de la teoría de control que posteriormente permitirá diseñar los lazos de control que regirán el correcto funcionamiento de la planta. Algunos de los puntos que se tratarán serán la selección de la estrategia de control (así como de los mecanismos utilizados para su despliegue), la elección justificada de las variables controladas y su relación con los objetivos del lazo de control además de aportar una descripción de los elementos de control de cada lazo con sus algoritmos correspondientes y la instrumentación precisa.

11.1 Introducción al control de procesos químicos

Una planta de proceso química no es más que un conjunto de unidades de proceso (reactor, intercambiadores de calor, bombas centrífugas, columnas de destilación, tanques...) integradas de manera armónica de un modo sistemático y racional puesto que el objetivo principal es convertir las materias primas/reactivos -la alimentación- en los productos deseados empleando las fuentes disponibles de energía de la manera más eficiente posible. Durante su operación en estado estacionario, la planta debe satisfacer diferentes especificaciones impuestas por el diseño, así como las condiciones establecidas de carácter técnico, económico y social sujetas a influencias externas cambiantes, conocidas con el nombre de perturbaciones. Entre estos requerimientos destacan los siguientes (47):

- Seguridad: la operación segura de un proceso es un requerimiento primario para el bienestar del personal de planta y del entorno de la instalación. Por ello, las presiones, temperaturas y concentración de los productos químicos durante la operación deben permanecer en todo momento dentro de límites considerados como aceptables. A modo de ejemplo, se debe evitar el desarrollo de mezclas explosivas durante la operación de la planta.
- Especificaciones de producción: una planta de proceso debe producir la cantidad de diseño de un determinado producto (que no es otra cosa que la capacidad de la planta) cumpliendo unos determinados requerimientos de calidad; de ahí que un sistema de control sea necesario para garantizar el nivel de producción y las especificaciones de pureza de los productos.
- Normativas ambientales: la normativa ambiental existente y aplicable tanto a nivel autonómico, estatal, europeo o mundial establece límites sobre flujos, temperaturas y concentraciones de compuestos químicos que se emiten como efluentes: CO₂, SO₂ o NO_x a la atmósfera o la calidad de las aguas residuales que se devuelven a un río.
- Restricciones operacionales inherentes a los equipos empleados en planta: las bombas centrífugas deben mantener una cierta carga neta de aspiración positiva, los tanques no deben rebosar o quedar completamente vacíos, las columnas de destilación no deben inundarse o la temperatura en un reactor catalítico no debe superar un cierto valor límite para evitar la desactivación del

catalizador; los sistemas de control son necesarios para satisfacer estas restricciones de operación.

- Economía: en términos de rentabilidad económica, ya que la operación de una planta de proceso debe estar en sintonía con la actualidad del mercado de materias primas y productos en tanto a disponibilidad y demanda respectivamente, teniendo en cuenta los precios correspondientes. Las condiciones de operación deben corresponder a mínimo coste, o lo que es lo mismo, máximo beneficio.

Existen tres tipos generales de necesidades que un sistema de control debe satisfacer:

- Eliminar la influencia de perturbaciones externas: estas muestran el efecto del entorno sobre las diferentes unidades de proceso y están fuera del alcance del operador. Por este motivo se requiere un mecanismo que provoque los cambios adecuados sobre el proceso que eliminen el impacto negativo inherente de las perturbaciones sobre la operación en estado nominal de una planta de proceso química.
- Asegurar la estabilidad: aplicable a aquellos casos en los que el proceso sea inestable, cuando la variable de control no retorna al valor nominal después de la influencia de una perturbación externa. Estos sistemas requieren de un control externo para su estabilización.
- Optimizar el rendimiento de un proceso: la seguridad y la satisfacción de las especificaciones de producción son los dos principales objetivos operaciones de una planta química; cuando estos dos se consiguen el próximo objetivo es mejorar la viabilidad económica de la planta mediante el establecimiento de condiciones de operación de forma que el beneficio se maximice.

Por todos estos motivos es obligatorio una monitorización continua de la operación en una planta de proceso junto a un sistema de intervención externa que asegure el cumplimiento de los objetivos establecidos: el control se realiza de manera automática empleando instrumentación y ordenadores que permiten realizar todas las operaciones de control sin intervención humana; no obstante, el diseño de estos lazos de control es labor exclusiva de los ingenieros asignados.

11.2 Diseño genérico de un lazo de control

El control se puede llevar a cabo empleando personas pero supone una serie de acciones repetitivas que causan cansancio (abrir y cerrar válvulas manualmente) e incluso algunos cálculos pueden ser muy complejos o exigen una acción inmediata que no es humanamente posible (el operador no siempre se encuentra cerca del elemento final de control). No obstante, el diseño y mantenimiento de los sistemas de control no se pueden concebir sin influencia humana.

La definición y estructura de un lazo de control es un trabajo conjunto entre la ingeniería de procesos y la propia ingeniería de C&I: el diseño del proceso se debe enfocar de forma que su control sea factible en tanto a que una planta poco susceptible a perturbaciones externas es más fácil de controlar, reduciendo la frecuencia y magnitud de las mismas. Hay que tener en cuenta asimismo que solo se puede controlar lo que es medible, por lo que la selección de sensores debe ir en la línea de medir variables rápidamente y con alta precisión, y definir qué elementos finales de control actuarán sobre las variables a ajustar: las válvulas que actúan sobre el flujo de fluidos son equipos de uso extendido en las plantas químicas. Finalmente se decide la estructura de control (qué variable ajustar para controlar qué medida) y el algoritmo de control (modelización matemática de lazo de control, ajustando los parámetros correspondientes).

Para cumplimentar los diferentes puntos de esta misión basta con dar respuesta a la siguiente serie ordenada de preguntas:

- ¿Cuáles son los objetivos operacionales que se desean alcanzar con el sistema de control?
- ¿Cuáles son las medidas que hay que realizar para controlar un proceso?, tratando siempre de monitorizar las variables que representan los objetivos de control (medidas primarias). Sin embargo, cuando los objetivos de control no son magnitudes medibles es necesario acudir a otras variables que sí se puedan computar de forma fiable y sencilla, estableciendo posteriormente una relación. Básicamente consiste en el establecimiento de las variables controladas.
- ¿Cuáles son las variables que hay que modificar para controlar un proceso? Básicamente consiste en el establecimiento de las variables manipuladas.
- ¿Cuál es la forma de relacionar las medidas disponibles con las variables a modificar? Definición de la configuración de control.
- ¿Cómo se utiliza la información de las medidas realizadas para modificar los valores de las variables manipuladas? La respuesta es la regla de control que permite el diseño del controlador correspondiente.

11.3 Terminología técnica

La rama del Control de Procesos posee una nomenclatura propia que no se explicita en ningún otro apartado del presente trabajo. Es por este motivo por el que la jerga que se emplea en esta sección de Control e Instrumentación se presenta a continuación:

- Variable controlada (VC): variable seleccionada para realizar su control por ser la principal representante de una magnitud que se desea controlar. Su valor se computará mediante el uso de sensores.

- Variable manipulada (VM): variable sobre la que actúa el elemento final de control (habitualmente una válvula) con el fin de cambiar el valor de la variable controlada.
- Elemento primario de control (EPC): instrumento empleado para medir el valor de una variable de proceso. Si se trata de la variable controlada se habla de medida directa mientras que si esta no se da computado sencillamente se registra otra variable que posteriormente se relaciona con la primera, hablando de medida indirecta.
- Elemento final de control (EFC): instrumento cuya finalidad es la de ejecutar acciones sobre la variable manipulada siguiendo las directrices establecidas por el controlador.
- Set Point (SP): también conocido como punto de consigna. Valor nominal de estado estacionario sobre el que se diseña el funcionamiento de un determinado proceso.
- Error (ϵ): la influencia de perturbaciones externas desvía el valor de la variable controlada del punto de consigna. El error se define simplemente como la diferencia entre ambos conceptos.
- Transmisor: instrumento que se encarga de transformar la señal del sensor en una señal apta (que sigue estándares internacionales estipulados por la IEC) para su transmisión hasta el controlador. Esta señal puede ser de diferente naturaleza, siendo las más utilizadas a nivel industrial la de tipo neumático (aire comprimido de 3-15 psig) y la analógica (corriente eléctrica en el rango de 4-20 mA). Habitualmente estos transmisores están acoplados al sensor que constituye el elemento primario de control formando un único instrumento.
- Controlador: elemento del lazo de control que recibe la señal de la variable de entrada (VC) medida por el EPC y transmitida por el transmisor, la compara con el punto de consigna (SP) para calcular el error (ϵ) correspondiente, que determinará la labor de corrección que el EFC debe efectuar sobre la variable manipulada (VM).

La estructura general de un lazo de control SISO (*single input-single output*) se representa gráficamente en el diagrama de bloques presentado en la figura 29:

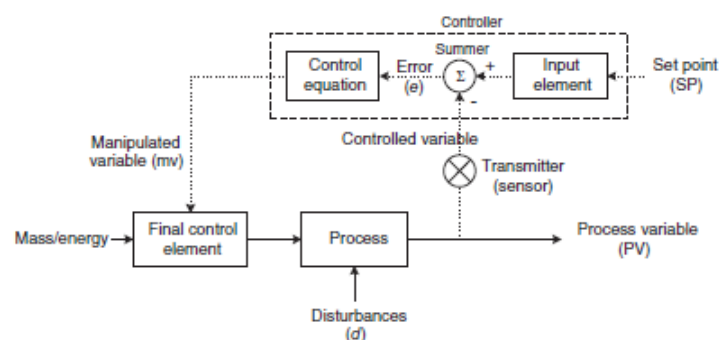


Figura 29: Relación entre los elementos que configuran un lazo de control (48)

11.4 Configuraciones de control

Para dar respuesta a la 4ª pregunta planteada en el diseño genérico de un proceso (*¿Cuáles son las variables que hay que modificar para controlar un proceso?*) hay que valorar de manera profunda las consecuencias que tiene la elección de una variable controlada y el momento de la influencia de la perturbación externa. Siguiendo este criterio, según la localización de los elementos del lazo de control se distinguen tres relaciones básicas entre las variables controladas y las variables manipuladas (47):

- Control feedback: utiliza medidas directas de las variables controladas para modificar los valores de las variables manipuladas. El objetivo es mantener las variables controladas en los valores deseados (SP). Este tipo de control hace que el elemento final de control actúe sobre la variable manipulada una vez la perturbación se ha producido. Es una configuración de control que presenta problemas en sistemas con elevado tiempo de respuesta ya que desde que se produce la perturbación hasta que el sistema de control la detecta para poder actuar puede transcurrir una gran cantidad de tiempo.
- Control deductivo: la configuración es idéntica a la del *feedback* siendo la única diferencia la tipología de variable controlada. En este caso, se utilizan medidas secundarias (puesto que las VC no se pueden medir) para modificar los valores de las variables manipuladas. El equipo de cálculo (conocido como *estimator*) situado antes del controlador utiliza las variables medidas junto con los balances de materia y energía (se tienen que cumplir ambos Principios de Conservación) para calcular los valores de las variables controladas no medidas; estas estimaciones son las que emplea el controlador para ajustar el elemento final de control que actúa sobre las variables manipuladas.
- Control feedforward: emplea medidas directas de las perturbaciones para ajustar los valores de las variables manipuladas. Se trata por lo tanto de una especie de control anticipativo (de ahí su nombre) que computa la variable de entrada al sistema y mediante expresiones matemáticas calcula el valor de VM para corregir la perturbación antes de que esta tenga lugar. Es un tipo de control que únicamente es válido cuando se dispone de una gran cantidad de información acerca de la dinámica del proceso; no obstante, no tiene en cuenta el valor de VC, por lo que si se está cometiendo un error sistemático no se va a ver corregido por el lazo de control.
- Control híbrido feedforward-feedback: configuración de control basada en la combinación de las dos estrategias que le da nombre. Primeramente el control se anticipa a la perturbación en un primer momento siguiendo un arreglo anticipativo y los posibles errores cometidos son subsanados con el sistema feedback que lógicamente tiene en cuenta la información de lo que acontece en el proceso. Se introduce esta metodología puesto que a escala industrial la configuración *feedforward* sola es muy poco práctica.

La configuración de control más utilizada a nivel industrial, puesto que es más completa ya que tiene en cuenta la información que almacena la dinámica del sistema, se basa en sistemas feedback, de ahí que la mayor parte de los lazos de control diseñados para la planta de producción de acetato de etilo responda a esta morfología. Existen otras configuraciones más complejas, como el control supervisorio o en cascada. Si se desea consultar información acerca de los mismos, se recomienda la magnífica monografía de T. Kuphaldt titulada *Lessons in Industrial Instrumentation*, accesible a todo el mundo puesto que es Creative Commons, donde trata estos aspectos en su capítulo 31 titulado *Basic Process Control Strategies*.

11.5 Algoritmos de control

Para dar respuesta a la 5ª y última pregunta que nace a la hora del diseño genérico de un lazo de control (*¿cómo se utiliza la información de las medidas realizadas para modificar los valores de las variables manipuladas?*) hay que tener en cuenta que el propósito último de un controlador en control regulatorio (el que se aplica para perturbaciones de carga; también puede haber cambios en el valor de consigna con lo que se habla de servocontrol) es mantener el valor de la variable controlada en su correspondiente punto de consigna: esto se consigue con un cambio en la variable manipulada utilizando un algoritmo de control. En este apartado se explicarán los algoritmos básicos utilizados en lazos de control *feedback* (48):

11.5.1 Control on-off

Es la forma más básica de control donde el elemento final de control es un pulsador, por lo que no hay regulación alguna sobre la variable manipulada. Un buen ejemplo de este tipo de control es el sistema de calefacción de una casa: cuando la temperatura supera el valor de consigna la caldera se apaga; por contra, cuando la temperatura cae por debajo del SP la caldera se enciende.

Resulta una estrategia muy sencilla, barata, fiable y apropiada para aquellos casos en los que es suficiente mantener la VC entre dos límites, como en el caso de los tanques de almacenamiento. No obstante, debido a la continua instrucción de abrir y cerrar, el EFC se desgasta rápidamente y es necesaria su sustitución, de ahí que se opte por incorporar una zona muerta ajustable dentro de la cual no hay acción de control con el fin de minimizar la acción cíclica de la salida del controlador y alargar la vida útil del EFC.

11.5.2 Modo proporcional

Es el modo de control más sencillo para eliminar las oscilaciones en un lazo de control *feedback*, evitando el comportamiento oscilatorio de la variable de proceso, pero no se garantiza su devolución al punto de consigna. Para entender mejor este concepto, se desarrolla el siguiente ejemplo, que describe el protocolo de actuación del modo proporcional:

Imagínese un tanque de almacenamiento de un líquido en el que el problema reside en que este no debe rebosar ni quedar vacío; si el flujo de entrada es igual al de salida el nivel permanece constante pero si el flujo de salida aumenta el nivel empezará a caer. A fin de detener la caída del nivel hay que aumentar el flujo de entrada abriendo el elemento final de control -la válvula- regulador hasta que iguale al flujo de salida y el nivel deje de caer. No obstante, el nivel del tanque no se encontrará en el nivel inicial, sino que habrá descendido hasta un nuevo estado estacionario; esta caída de nivel viene proporcionada por el grado de apertura de la válvula de entrada.

Matemáticamente, la salida de este tipo de controlador es proporcional al error:

$$vm = K_C \cdot \varepsilon \quad (9)$$

siendo K_C la ganancia del controlador. Tras un razonamiento matemático que se escapa al objetivo del presente trabajo, se llega a la conclusión de que para reducir el error a 0 y que el nivel inicial fuese igual al nivel final, el valor de la ganancia del controlador debería ser infinito; el problema radica en que la ganancia del lazo K_L , producto de todas las ganancias de los elementos del mismo (controlador, transmisor, sensor...), no puede ser mayor que 1 puesto que el lazo se vuelve inestable. Es por esta razón por la hay un límite en el valor de la ganancia proporcional del controlador.

La alternativa que se adopta para reducir el error a 0 es añadir un nuevo término a la expresión que modeliza matemáticamente el comportamiento del controlador proporcional. El término adicional se denomina *bias* y se define como la salida del controlador cuando el error es cero:

$$vm = K_C \cdot \varepsilon + b \quad (10)$$

Si K_C toma un valor tal que la ganancia total del lazo K_L es igual a la unidad, el lazo oscilará con un período que es función de las características naturales de la dinámica del proceso, conocido también como período natural τ_N , donde la variable controlada se amortigua siguiendo una relación de amortiguación de $\frac{1}{4}$ (QDR: *quarter decay ratio*) y un período aproximadamente igual al período natural, estabilizándose con una desviación permanente (*offset*) que es función de la ganancia del controlador y del *bias*.

El *offset* es el error permanente que se produce cuando la variable controlada no vuelve al valor de consigna nominal incluso después de haber devuelto al proceso a un nuevo estado estacionario. Suponiendo que existe una relación lineal entre la variable controlada y la variable manipulada, es fácil definir la ganancia del controlador en modo proporcional como:

$$K_C = \frac{\Delta VM}{\Delta VC} = \frac{100\%}{\Delta VC} \quad (11)$$

lo que indica que la ganancia del controlador en modo proporcional no es más que la cantidad que debe cambiar la variable controlada para que la salida del controlador, y por tanto la apertura del elemento final de control, se modifique en un 100%.

11.5.3 Modo integral

La finalidad principal del control integral consiste en eliminar cualquier error (*offset*) que pueda existir. Mientras exista desviación permanente la salida de este algoritmo de control continúa actuando sobre el elemento final de control con el propósito de extinguir el error. La ecuación que modeliza matemáticamente este comportamiento es:

$$vm = \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon dt + v_{m0} \quad (12)$$

donde v_{m0} se define como la salida del controlador antes de la integración, un concepto similar al *bias* anteriormente explicado que se refiere a la condición inicial antes de que actúe el modo integral en el lazo de control. Si la medida de la variable controlada se aumenta en escalón a tiempo t_1 y retorna al valor de consigna en tiempo t_2 , la salida se incrementa continuamente en el intervalo $[t_1, t_2]$ ya que el controlador está integrando el escalón a la entrada; cuando la medida retorna al valor de consigna la salida mantendrá el valor que el controlador alcanzó ya que matemáticamente es el correcto ($\varepsilon=0$).

La velocidad con la que la salida del controlador se incrementa es función de la magnitud del error y del tiempo integral, T_i , que se define como el tiempo que le lleva a la salida del controlador cambiar en una cantidad igual al error. Por lo tanto, se mide en unidades de tiempo por repetición del error. La figura 30 muestra las respuestas de controladores a un cambio de la variable controlada en escalón:

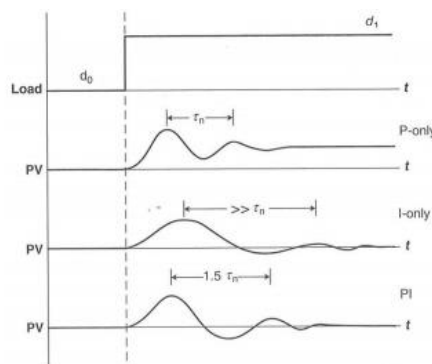


Figura 30: Diferentes respuestas del controlador, en función del algoritmo especificado, a un mismo cambio en escalón de la variable de proceso (48)

Se puede percibir de manera muy clara que un controlador integral tiene la ventaja de eliminar la desviación permanente pero a costa de sacrificar tiempo de respuesta en tanto a si se compara con el controlador proporcional.

Tal y como se ha mencionado con anterioridad, la salida del controlador proporcional cambia tan pronto como la medida cambia de tal manera que se puede decir que el controlador sigue el cambio. Así si la medida cambia en escalón, la salida cambia como un escalón en una cantidad que depende lógicamente de K_c ; pero para un controlador integral la salida no cambia instantáneamente sino que lo hace a una velocidad que es

función de T_i y el error, lo que provoca un retardo que puede llegar a causar que la respuesta del modo integral sea 10 veces más lenta que el proporcional. Por ello, si se requiere que no exista *offset* y es necesario una respuesta rápida, el controlador debe contener acción proporcional e integral conjuntamente.

11.5.4 Modo proporcional-integral

Un controlador proporcional-integral tendrá un periodo de respuesta mayor que un controlador P pero mucho más corto que un controlador I, como se observa en la figura 30. Como heurística, el tiempo de respuesta de la variable de proceso bajo control PI es 1.5 veces mayor que para control P; puesto que esta respuesta es mucho más rápida que I solo y solo un poco más lenta que P solo, la gran mayoría de los controladores en las plantas industriales son PI, cuya ecuación matemática se explicita a continuación:

$$vm = K_C \cdot \varepsilon + K_C \cdot \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon dt \quad (13)$$

donde se puede comprobar que la ganancia proporcional no afecta en exclusiva al error sino también a la acción integral. Si se compara esta ecuación con la correspondiente al control P, el único cambio es que el *bias* ha sido sustituido por el término integral, con lo que la acción integral proporciona un *bias* que se ajusta automáticamente para eliminar cualquier error. Además, la incorporación de la acción proporcional al control integral provoca un aumento en la rapidez, al producirse de manera instantánea un cambio proporcional seguido inmediatamente de la acción integral, con lo que se redefine el tiempo integral, T_i , como el tiempo consumido por la acción integral para replicar la acción proporcional. Cuando la medida se devuelve al SP, la acción proporcional se pierde al ser el error nulo y la salida del controlador viene determinada únicamente por la acción integral.

Los parámetros de ganancia del controlador y tiempo integral se utilizan para ajustar la ganancia global del controlador PI para que el lazo ofrezca la respuesta que se desee:

- Si T_i tiende a infinito la respuesta sería la de un controlador P con un periodo igual a τ_N y con *offset*. En la práctica esta situación no existe, aunque para valores del tiempo integral muy elevados, la acción I resulta muy menguada.
- Si T_i toma un valor muy bajo la acción del controlador sería la de un I solo, garantizando el retorno al SP sin desviación permanente pero con un elevado período de respuesta.

Existen casos en los que para aumentar la velocidad de respuesta puede llegar a ser necesario incorporar un modo de control adicional, la acción derivativa.

11.5.5 Modo derivativo

Se emplea básicamente con el propósito de superar los retardos en el lazo de control, o lo que es lo mismo, predice hacia donde se encamina el proceso observando la velocidad de cambio del error, que matemáticamente coincide con el concepto de cálculo diferencial. Por esto, la ecuación que modeliza esta acción del controlador es la siguiente:

$$vm = T_d \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (14)$$

Al aumentar la derivada del error con respecto al tiempo, aumenta la salida del controlador y dado que la pendiente de cada una de las entradas es constante, la salida para cada una de ellas también lo será. No obstante, cuando la pendiente tiende a ∞ como en el caso de un cambio en escalón la salida teórica debería ser un impulso de amplitud infinita y duración nula. Físicamente esto es imposible aunque lo que sí se produce son señales de picos y valles de muy poca duración que se conocen como ruido.

De este modo, la salida del controlador de acción derivativa consistiría en una serie de impulsos tanto positivos como negativos que desplazarían el elemento final de control desde la posición de completamente abierto a completamente cerrado provocando un desgaste acelerado en la válvula y una estrategia de control poco útil desde un punto de vista práctico.

Para contextualizar más claramente los problemas de la acción derivativa, piénsese en la medida de una temperatura que tuviese un ruido de pequeña amplitud y alta frecuencia; es fácil ver que si el ruido es de baja amplitud con respecto a la temperatura media medida, el controlador ni se daría cuenta (si este no tuviese acción derivativa). Ahora bien, si posee modo derivativo la señal de la temperatura queda completamente enmascarada por el ruido y la salida del controlador sería un conjunto caótico de impulsos de gran amplitud (el 100% de la capacidad de movimiento del elemento final de control) bloqueando la contribución a la salida del controlador del resto de algoritmos de control. En estos casos el ruido se filtra o elimina mediante *hardware* incorporado en el elemento primario de control.

No obstante, existen casos en los que el ruido es inherente en la medida de la variable de proceso y es de magnitud similar a la de la propia medida, como en el caso del control de flujo. En esta situación filtrar el ruido tendría la consecuencia de degradar la precisión de la medida de la variable de proceso y el control derivativo no estaría recomendado. Afortunadamente, la acción derivativa no se encuentra nunca sola en el algoritmo de control, ya que no reconoce cuál es el punto de consigna; solo es capaz de reconocer que el error está cambiando.

11.5.6 Modo PID: proporcional-integral-derivativo

El objetivo principal de un controlador PID es proporcionar un periodo de respuesta que sea parecido al del control proporcional pero sin desviación permanente, como se puede constatar en la figura 31:

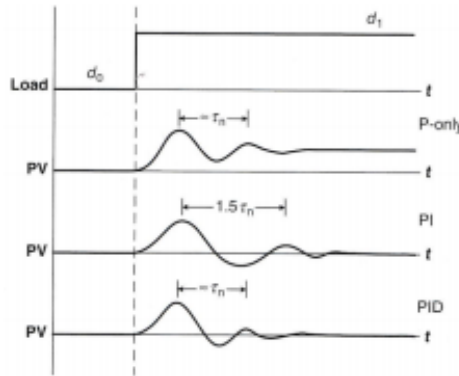


Figura 31: Comportamiento en respuesta de los diferentes controladores a una misma perturbación en escalón (48)

Se observa cómo la acción derivativa añade la velocidad de respuesta extra para solventar el retardo en la respuesta causado por la acción integral. La ecuación que modela el comportamiento de un PID es igual que la de un PI pero teniendo en cuenta la acción derivativa:

$$vm = K_c \cdot \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon dt - T_d \cdot \frac{CV}{dt} \right) \quad (15)$$

La adición del término derivativo al controlador PI proporciona una respuesta en tiempo idéntica al proporcional, sin desviación permanente debido a la acción integral. La respuesta se optimiza pero no se debe utilizar en ningún proceso en el que se prevea la existencia de ruido.

11.6 Ajuste de controladores feedback

Desde un punto de vista estricto, no existe una forma correcta (del mismo modo que no existe una manera incorrecta) de sintonizar un controlador. Los ajustes del mismo dependen del juicio del ingeniero de control e instrumentación en tanto a la consideración de una buena respuesta a las perturbaciones del proceso. La dinámica del proceso, su ganancia, la constante de tiempo y el tiempo muerto juegan un papel fundamental a la hora de estipular los ajustes del controlador. Habitualmente, en el control de procesos la mayoría de los sistemas se sintonizan para control regulatorio, que es el que hace frente a perturbaciones de carga (48).

La sintonización de controladores se puede definir como un proceso de optimización que incluye criterios de rendimiento referidos a la forma de respuesta del controlador y a la desviación permanente entre variable de proceso y punto de consigna. Puesto que la estrategia feedback es la más utilizada a nivel industrial, se dan algunos aspectos superficiales relacionados con la sintonización de este tipo de lazos.

11.6.1 Respuesta del controlador

A la hora de sintonizar un controlador algunas de las preguntas que surgen están dirigidas hacia la aceptabilidad o no de una desviación permanente, la presencia o no de una sobreactuación, la necesidad o no de una determinada relación de amortiguación y finalmente si es obligatorio una respuesta rápida o no. Dependiendo del proceso a controlar, la primera cuestión pues es decidir qué respuesta es óptima, o al menos se puede considerar como aceptable.

Para una perturbación de carga las respuestas habituales son 3: sobreamortiguada (representada en la figura 32 como 1) que consiste en una respuesta lenta sin oscilación, amortiguada crítica (2) que consiste en una respuesta rápida sin oscilación e infraamortiguada (3), o retorno rápido al *set point* con oscilación significativa, como se puede observar en la figura 32. Se puede comprobar del mismo modo que la selección de un buen control es un compromiso entre velocidad de respuesta y desviación del valor de consigna.

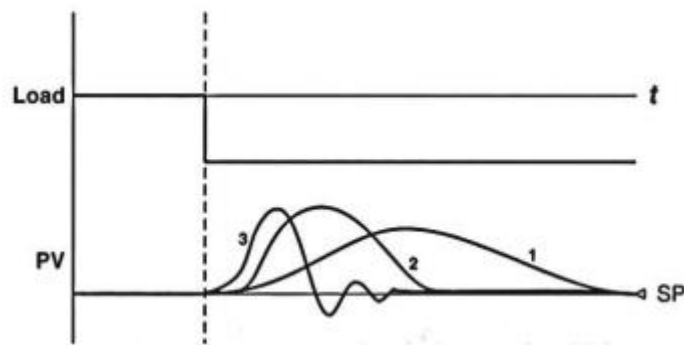


Figura 32: Respuestas habituales de un controlador (48)

Existen varios criterios de rendimiento que pueden cumplirse para la sintonización de controladores y que están basados en las características de la respuesta del sistema en lazo cerrado. Algunos de los más frecuentes son:

- **Sobreactuación:** parte de la respuesta que excede del valor en estado estacionario.
- **Rise time:** tiempo necesario para la respuesta transitoria en alcanzar el valor de estado estacionario.
- **Response time:** tiempo requerido para que la respuesta se sitúe dentro de límites aceptados ($\pm 5\%$ del valor de la variable de proceso)
- **Relación de amortiguación:** relación entre la amplitud de dos oscilaciones consecutivas. A nivel industrial se busca, como se ha indicado anteriormente, la relación de amortiguación de un cuarto (QDR), de tal modo que en dos oscilaciones se ha alcanzado el tiempo de respuesta. Este criterio se utiliza con

frecuencia para establecer si el controlador, con un determinado ajuste, proporciona una respuesta satisfactoria.

11.6.2 Criterios basados en el error

Además de los criterios basados en la respuesta del sistema en lazo cerrado, también se puede evaluar la sintonización de un controlador teniendo en cuenta la respuesta completa del proceso. Para tenerlo en cuenta, se suele representar la respuesta de un lazo de control a una perturbación del proceso del modo expuesto en la figura 33:



Figura 33: Respuesta de la variable de proceso ante una perturbación externa bajo la influencia de un determinado controlador (48)

Una de las maneras de evaluar el error es teniendo en cuenta el error integrado, que no es más que el área bajo la curva de respuesta, siendo el objetivo final el minimizar su área para optimizar el rendimiento de la respuesta. Existen otras formas de aplicar este criterio que también tienen en cuenta el tiempo de respuesta, siendo el más utilizado el criterio ITAE: error absoluto-tiempo integrados, que provoca que los errores que se mantienen durante un cierto tiempo, aunque sean de pequeña cantidad, se vean penalizados, lo que proporciona una respuesta más amortiguada.

11.6.3 Métodos de sintonización

A continuación, se describen algunos de los métodos más frecuentemente empleados para el ajuste de controladores. En cada caso, los parámetros del controlador se optimizan con respecto a un criterio de tratamiento del error, comúnmente la relación de amortiguación QDR. El clásico método científico de ensayo-error (las directrices recomendadas se pueden consultar en el apartado 5.2.1 '*Trial and Error Method*' de la referencia bibliográfica 48), suponiendo unos valores y chequeando las respuestas en un simulador de dinámicas de proceso puede servir para obtener unos ajustes iniciales que posteriormente se depuran con metodología que se basa en la curva de reacción del proceso.

En estos métodos se genera una curva de reacción del proceso en respuesta a una perturbación, y esta se utiliza para calcular la ganancia del controlador y los tiempos integral y derivativo; estos métodos se aplican en lazo abierto por lo que no hay acción de control. Para generar una curva de reacción del proceso, se parte del estado estacionario y se introduce una pequeña perturbación obteniendo la curva de reacción de la variable de proceso. La figura 34 muestra la morfología típica:

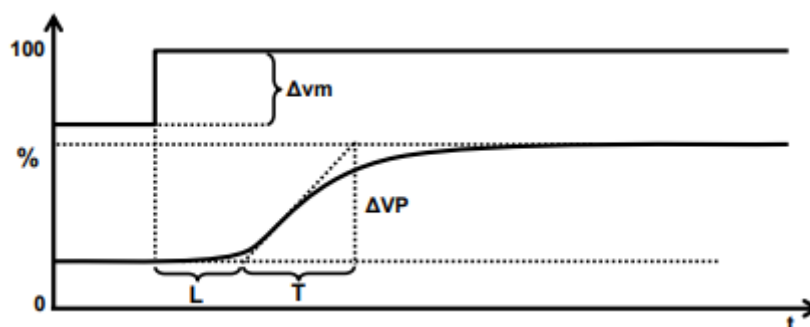


Figura 34: Curva de reacción de proceso para un proceso autorregulado genérico (48)

donde se puede definir la velocidad de reacción, N , como la variación de la variable de proceso ΔVP en el tiempo de reacción T . Todos estos parámetros asociados a la curva de reacción del proceso influyen en los métodos de sintonización más utilizados a nivel industrial: reglas de lazo abierto de Ziegler-Nichols, reglas de lazo abierto de Cohen-Coon, reglas de ajuste IMC (*Internal Model Control*) y reglas de lazo cerrado de Ziegler-Nichols.

Si el lector se encuentra ávido para conocer las expresiones matemáticas que rigen estos métodos de sintonización, lo emplazamos a leer el apartado 5.2.2 *Process Reaction Curve Methods* de (48), libro canónico que se ha asumido como primera referencia para el tratamiento teórico del apartado de control e instrumentación.

11.7 Nomenclatura

Para designar los lazos de control de una determinada planta de proceso química se emplea la nomenclatura definida por la norma ISA-5.1, que uniformiza de una manera homogénea la identificación y representación de instrumentos y dispositivos asociados, sistemas de instrumentación y lógica de aplicación de software para la medida, indicación y control, introduciendo un sistema de designación que abarca sistemas de identificación y símbolos gráficos. La nomenclatura utilizada responde al siguiente patrón:

$$AB - CDD$$

donde A es una letra que representa la variable controlada del lazo de control y B designa la tipología del lazo; esta primera parte nombra la función de la unidad, es decir, lo que realiza dentro del lazo. La parte de después del guion se corresponde con tres números, donde el primero de ellos, C , se corresponde con la sección de la planta en la cual se localiza el lazo de control y los dos siguientes, DD , con el número del lazo. En el diagrama de tuberías e instrumentación (a partir de ahora, P&ID) la representación de los instrumentos del lazo se realiza en círculos, donde en la parte superior se representa la funcionalidad y en la parte inferior el número del lazo. Ambas partes pueden estar separadas por:

- Línea continua: localización remota, montado en el panel de control.
- Línea punteada: localización remota, detrás del panel de control no accesible fácilmente
- Sin línea: montado en la propia planta de proceso, en campo.

En la siguiente tabla se recoge la nomenclatura establecida por la norma ANSI/ISA-5.1, donde una letra en primera posición identifica la variable controlada del proceso mientras que una letra en posiciones consecutivas identifica los elementos del lazo de control.

Tabla 17: Nomenclatura ANSI-ISA 5.1 para lazos de control

Letra	Primera posición	Posiciones consecutivas
A	Composición	Alarma
C	-	Controlador
F	Caudal/flujo	-
H	-	Alto
I	-	Indicador
L	Nivel	Bajo
P	Presión	-
S	-	Interruptor, seguridad
T	Temperatura	Transmisor
V	-	Válvula
Y	-	Conversor

11.8 Lazos de control

Una vez introducida brevemente la teoría básica de control e instrumentación, se presentan los diferentes lazos que son necesarios para operativizar de manera adecuada la planta de proceso.

11.8.1 Acondicionamiento de la alimentación: sección 100

El objetivo de los lazos de control situados en la zona de acondicionamiento de materias primas y reactivos es obtener a la salida de la misma una corriente que se encuentre a las condiciones óptimas de operación del reactor: una presión de 20 bar y una temperatura de 220°C.

11.8.1.1 Lazos de control TIC-101, TIC-102 y TIC-103

Con el propósito de garantizar el funcionamiento del reactor en sus condiciones óptimas, se debe asegurar la entrada de reactivos a una temperatura de 220°C, tal y como se estudió en el apartado 9.2 *Condiciones óptimas de operación: estudio termodinámico*. Por ello, se introducen 3 lazos de control en cada uno de los intercambiadores considerados en el diseño del PFD (el E-101 se encarga de calentar el líquido subenfriado hasta su punto de burbuja, el E-102 cumple la función de vaporizador y el E-103 recalienta el vapor saturado hasta la temperatura objetivo) que

regulen el caudal de entrada del fluido de servicio, vapor de media presión para el E-101 y el E-102 y vapor de alta para el E-103, al intercambiador de tal manera que se puede controlar la temperatura de salida de cada una de las corrientes.

El punto de consigna de cada uno de los lazos es diferente: el TIC-101 controla el E-101 y la temperatura de salida ha de ser la temperatura de saturación de la corriente de entrada a la presión correspondiente; el TIC-102 controla el evaporador E-102 y el set point coincide con la temperatura de consigna del lazo anterior (es conveniente recordar que el cambio de estado es una operación física que tiene lugar en régimen isotérmico). Finalmente, el punto de consigna del TIC-103 que regula la operación del E-103 coincide con la temperatura de alimentación al reactor. Ambos los tres se configuran en control *feedback*.

La instrumentación incluida en el lazo es la siguiente: como elementos primarios de control se utilizan sensores de temperatura (termopares, RTDs, NTCs), transmisores de señal TT normalmente acoplados al hardware del EPC, controladores-indicadores TIC localizados en el panel de control para facilitar la labor del operario, relés convertidores de señal TY y válvulas que manipulan el caudal del vapor de calefacción.

11.8.1.2 Lazo de control LIC-104

Puesto que en el intercambiador de calor E-102 se lleva a cabo una evaporación en un intercambiador del tipo kettle, además de registrar los valores de temperatura también es recomendable medir el nivel de líquido en la carcasa del evaporador, para garantizar que está siempre por encima de los tubos por los cuales fluye el vapor de alta presión.

Con este lazo de control se asegura una transmisión óptima de calor, minimizando el régimen de fluido calefactor necesario para acometer de manera exitosa la operación. Si el nivel de líquido está por debajo de los tubos, se abre la válvula que permite el paso de la corriente de alimentación a la carcasa del E-102, hasta que alcance el nivel estipulado como el punto de consigna.

11.8.1.3 Indicador de flujo FI-105

Con el propósito de garantizar el cumplimiento de la capacidad de diseño de la planta se introduce este indicador de tipo orificio, que proporciona la información necesaria al personal de planta con el fin de operar manualmente la válvula que permite el flujo de fluidos desde la zona de tanques de almacenamiento hasta la sección 100 de acondicionamiento de la alimentación.

11.8.1.4 Válvulas de alivio PSV-106/107/108

Las válvulas de seguridad destinadas al alivio de presión son de obligada instalación en aquellos equipos o sistemas que trabajen a una presión mayor a la atmosférica con el propósito de garantizar la seguridad de la planta ante episodios de sobrepresiones causadas por condiciones anómalas de operación. Las válvulas de alivio se instalan

asociadas a la sección de tubos en los intercambiadores de calor disponibles en la sección 100.

11.8.2 Reacción: sección 200

La sección 200 de la planta contiene el reactor de lecho empacado multitubular cubierto por una camisa por la que circula el fluido térmico, además de un circuito cerrado en el que se acondiciona este aceite para optimizar la operación de transmisión de calor con el fin de compensar el carácter endotérmico de la reacción global de deshidrogenación. Por lo tanto, en la salida del reactor es necesario analizar la composición de la corriente con el fin de determinar la conversión del etanol y la selectividad en el producto deseado. Se debe registrar así mismo la presión de salida para tener en cuenta la caída de presión debida al flujo a través de un lecho poroso. En el circuito de fluido térmico se debe medir tanto la temperatura de salida como la de entrada y su flujo, que rige la operación de transmisión de calor ya que la cantidad de gránulos de catalizador no se puede modificar en pleno transcurso de la operación.

11.8.2.1 Lazo de control TIC-201

Con este lazo se analiza la temperatura de la mezcla reaccionante a la salida del reactor, puesto que es una medida indirecta de la composición de la corriente de productos. Como se desarrolla en el Anexo II. Cálculos Justificativos, la resolución simultánea de los balances de materia y energía proporciona un perfil de temperaturas, lo cual identifica cada temperatura de salida del reactor con una determinada composición.

Se opta por esta solución en base a criterios de optimización, tanto operativos como económicos: un lazo de control de temperatura es mucho más rápido (menor tiempo muerto y mucho menor tiempo de respuesta) que uno de composición (véase por ejemplo, un densímetro), además de ser mucho más asequible en términos de precio.

Puesto que la cantidad de gránulos de catalizador dispuesta en el interior de los tubos no se puede modificar en el transcurso de la operación, este lazo de control actúa sobre la corriente de entrada al reactor. En base a la composición medida de manera indirecta a la salida se establece un mayor o menor paso de reactivos mediante la apertura o cierre, respectivamente, del elemento final de control.

11.8.2.2 Lazo de control PDIC-202

Se trata de un lazo de control de presión diferencial que permite registrar la diferencia de presiones entre la entrada de reactivos y la salida de productos tras su paso por el lecho poroso repleto de catalizador. La implementación de este lazo se justifica por motivos de seguridad, con el fin de detectar posibles tapones que causen un incremento anómalo de presión que tenga como consecuencia entrar en un rango de operación inseguro, y por motivos de operación, para estipular el régimen de trabajo del compresor que inicia la sección 300. Como es coherente, este lazo dispone de

alarmas para alertar sobre comportamientos extraños en el lecho catalítico con el propósito de avisar al personal de planta para llevar a cabo las decisiones oportunas.

11.8.2.3 Lazo de control TIC-203

La temperatura a la salida del reactor es una variable a controlar por motivos de seguridad; no obstante, al tratarse en este caso de una reacción endotérmica es imposible que se produzcan reacciones descontroladas del tipo *runaway* que deriven en un incremento exponencial de presión y temperatura y con ello un accidente fatal.

Más allá de anticipar problemas de seguridad, este lazo de control también se destina a la medida de la temperatura de salida, comparando su valor con el considerado como óptimo para detectar cualquier anomalía funcional de la operación, siendo corregida con la válvula que regula la entrada de fluido térmico a la carcasa del reactor R-201; a mayor caudal de fluido calefactor, mayor es la transmisión de calor y más efectiva la operación global del reactor catalítico heterogéneo R-201.

11.8.2.4 Lazo de control TIC-204

Este lazo de control se implementa con el fin de controlar la temperatura de entrada del fluido térmico al reactor R-201. En el intercambiador E-201 se introduce el fluido térmico a 220°C; pero para compensar la endotermicidad de la reacción global la temperatura del fluido térmico ha de ser mayor con el fin de ceder parte de su calor y que así la mezcla reaccionante opere en una especie de régimen isotérmico que proporcione los mejores datos de conversión y selectividad.

El elemento primario de control es un sensor de temperatura que registra como variable controlada la temperatura de entrada del fluido térmico a la camisa del reactor R-201; en función de la desviación con respecto al punto de consigna, el controlador actúa de tal manera que abre o cierra la válvula de fluido calefactor a alta temperatura (+300°C) para regular la transmisión de calor.

11.8.2.5 Válvulas de alivio PSV-205 y PSV-206

Se localizan válvulas de alivio de presión en forma de elementos metálicos en las zonas superior e inferior de la carcasa del reactor R-201 para evitar comportamientos anómalos derivados de un posible aumento de la presión en el medio de reacción. Se justifica en base a problemas de flujo en la sección de paso de la mezcla reaccionante a través del lecho poroso y al hecho de trabajar a una presión aproximadamente 20 veces superior a la atmosférica.

11.8.2.6 Alarmas PDAH-202, PDAL-202 y TAL-203

En la sección de reacción de la planta de proceso es necesario incluir dos alarmas, con propósitos fundamentalmente diferentes. En el reactor R-201 es recomendable equipar una alarma de presión elevada, puesto que es el punto más peligroso de toda la batería de procesos, para alertar al personal de planta con el fin de llevar a cabo las medidas correctivas superiores necesarias.

Por otro lado, desde un punto de vista meramente operacional, alimentar el fluido calefactor a camisa a una temperatura lo suficientemente baja se traduce en unos valores de conversión y selectividad muy lejanos al punto de consigna, de ahí que antes de la entrada a la carcasa calefactora, asociado al lazo de control TIC-203, se considere la utilización de una alarma de baja temperatura.

La alarma de presión baja PDAL-202 saltaría si la caída de presión medida con el lazo PDIC-202 fuese altamente elevada, lo que se traduciría en posibles fisuras en los tubos. Con este aviso los operarios de planta podrían ser conscientes de que se está perdiendo producto, teniendo que incluso detener la operación para arreglar los desperfectos ocasionados.

11.8.3 Acondicionamiento productos reacción: sección 300

En esta zona de la planta de proceso el objetivo consiste en aislar la corriente gaseosa de H_2 y adecuar las condiciones de la corriente líquida bruta para su posterior separación en la sección 400.

11.8.3.1 Lazo de control PIC-301

Para conseguir aislar el hidrógeno de manera adecuada, se ha realizado un estudio termodinámico donde se ha demostrado que la operación es factible a presiones elevadas, de ahí que haya que presurizar los productos gaseosos de reacción utilizando el compresor K-301. Puesto que se tratan caudales bajos de fluido, es recomendable utilizar un compresor reciprocante basado en el movimiento de un pistón impulsado por un sistema biela-manivela.

Otra de las ventajas de los compresores reciprocantes es que no necesita ningún tratamiento especial desde el punto de vista del control automático, puesto que el flujo volumétrico (m^3/s) de trabajo nominal del compresor es simplemente el volumen de la cámara multiplicado por el número de movimientos del pistón por minuto, que está directamente relacionado con las rpm a la que gira el motor. Ya que no se puede cambiar el volumen de la cámara, para cambiar la salida hay que modificar de alguna forma la frecuencia de rotación del elemento de impulsión (49); o lo que es más sencillo, modificar el flujo volumétrico de entrada.

Para finalizar, es importante destacar que el lazo de control actuará sobre una pequeña corriente de recirculación alrededor del compresor reciprocante con el propósito de que en respuesta a las perturbaciones externas no fluctúe de manera considerable el caudal de salida del reactor.

11.8.3.2 Lazo de control TIC-302

Se instala este lazo de control con la finalidad de registrar el cambio de temperatura necesario para operativizar el tanque flash V-301. La variable controlada es la temperatura de salida de la corriente de salida del intercambiador de calor E-301; el punto de consigna está estipulado en la temperatura más baja que se puede obtener

partiendo de un enfriamiento empleando agua de refrigeración (cw) como fluido de servicio. En función del error computado por el controlador, el elemento final de control actúa de una manera u otra sobre la válvula de paso del fluido refrigerante.

11.8.3.3 Lazo de control FI-303, PIC-304 y LIC-305

Para controlar la operación del depósito flash V-301 es necesario modificar las condiciones de presión y temperatura -como ya se ha indicado- de la corriente en la cual se va a separar la fracción vapor de la fracción líquida. La presión se ha modificado en el compresor recíprocante K-301 y la temperatura en el intercambiador de calor de carcasa y tubos E-301. El sistema de control relativo a un tanque flash consta de un indicador y dos lazos de control:

- Un indicador de flujo, FI-303, de tal manera que la entrada de fluido al tambor flash pueda ser medida con el fin de ser regulada manualmente por personal en planta. En el contexto de operación actual no es necesario incluir un lazo de control puesto que la producción horaria de H₂ no es el propósito principal de la planta de producción.
- Un lazo de control de presión, PIC-304, en la corriente de vapor que sale por cabezas del flash, ya que la composición de las salidas depende de la presión del recipiente. Si la presión se incrementa, entonces se abre la válvula para permitir una mayor salida de vapor; si la presión decrece, la válvula se cierra para disminuir la salida de corriente gaseosa y que vuelva a aumentar la presión.
- Las acciones orquestadas por el lazo de control de presión tendrán un efecto directo sobre el nivel de líquido en el tanque; véase por ejemplo que si la presión decrece entonces se vaporizará más líquido y el nivel disminuirá. Por ello es necesario incluir un lazo de control de nivel, LIC-305, que básicamente asegura que el tanque no se inunde ni quede seco. En el contexto de la operación actual es importante evitar que el tambor esté repleto de líquido orgánico, de ahí que se incluya una alarma que se active con nivel alto en fondos del tanque V-301.

11.8.3.4 Válvulas de alivio PSV-306/307/308

Nuevamente, se emplea esta tipología de dispositivos mecánicos en aquel equipamiento cuya presión de trabajo exceda la atmosférica: la PSV-307 se asocia al funcionamiento del compresor recíprocante K-301, la PSV-308 a la carcasa del intercambiador de calor E-301 (por tubos fluye agua de enfriamiento a presión atmosférica) y en el depósito flash V-301 se incluye la PSV-309; recordemos que la presión de trabajo en este último equipo es de 25 bar.

11.8.4 Zona de separación: sección 400

Finalmente, la sección 400 tendrá la finalidad de aislar los compuestos claves en la planta de proceso: mediante un tren que contiene 3 columnas de destilación se rompe el azeótropo etanol-acetato de etilo, se separa el etanol con el fin de recircularlo a la

sección 100 y se aísla una producción horaria de acetato de etilo en una corriente con una pureza superior al 99.8% de pureza, de tal manera que se cumplimenta la capacidad de diseño. Desde un enfoque puro al control e instrumentación, se utilizarán lazos de control clásicos para la operación de las columnas de destilación T-401, T-402 y T-403. Se asume que la estructura de los controladores será del tipo PID con una estrategia *feedback*, la cual se puede encontrar en los sistemas de control distribuido (DCS) dispuestos a escala comercial. Como referencia para el control de estas columnas se adoptará el capítulo 8. *Distillation Column Control* de la bibliografía (48) de Svrcek.

11.8.4.1 Lazo de control PIC-401

El lazo de presión que se utiliza en la zona de cabezas de la torre de destilación se utiliza para registrar y mantener la presión en el valor de diseño en estado estacionario. Para estudiar cuáles son las variables controladas y manipuladas más adecuadas para medir la presión, hay que ver qué parámetros ejercen una mayor influencia: la presión en la columna se genera por el vapor de *boil-up* y se alivia con la condensación; puesto que se trabaja con un condensador total, utilizar como variable manipulada el flujo de refrigerante es una opción realmente factible.

Se emplea un sensor-transmisor que mide la presión del vapor que sale por cabezas de la columna y transmite la información al controlador; en función de la desviación con respecto al punto de consigna se ajusta el caudal de refrigerante al condensador (si aumenta la presión es necesario aumentar la condensación, abriendo el elemento final de control para permitir un mayor caudal de refrigerante).

11.8.4.2 Lazo de control FIC-402

El principal objetivo de este lazo es controlar la corriente de recirculación a la columna; el sensor es un medidor de orificio o boquilla que controla el caudal que además transmite la información al controlador, que actúa sobre el elemento final de control situado en la conducción de recirculación que enlaza el tanque de reflujo con la zona superior de la columna de destilación.

El set-point está enlazado directamente con la pureza que requiera la producción (a mayor reflujo a la columna, mayor pureza del destilado). Asimismo, con este lazo se regula el reflujo a la columna de tal manera que, además de alcanzar el grado de separación deseado, no se produzca una inundación de la misma lo cual implicaría una parada en la operación de la planta.

11.8.4.3 Lazo de control LIC-403

Básicamente controla el nivel del tambor de reflujo regulando la corriente de destilado que sale por cabezas de la columna de destilación, dado que se deben evitar casos en los que haya una inundación o un vaciado puesto que esto afecta de manera significativa a la estabilidad de la operación de la columna.

La determinación de las variables manipuladas debe hacerse nuevamente siguiendo un enfoque coherente: hay que escoger aquellas corrientes que tengan un mayor impacto, lo cual en este caso viene estipulado por la razón de reflujo (*reflux ratio*). Por ejemplo, si una columna tiene un ratio de reflujo de 100, por cada 101 unidades que entran al condensador 100 se van a devolver a la columna y 1 va a salir como destilado, por lo que el reflujo a la columna debería ser la variable manipulada que controle el nivel de líquido en el interior del tambor de reflujo (variable controlada). Se implementa un lazo del tipo *stand-pipe* para medir el nivel de líquido en el interior del tanque.

11.8.4.4 Lazo de control TIC-404

Este lazo se utiliza con el fin de controlar el grado de separación de los productos, ya que medir y registrar la temperatura es una manera indirecta de analizar la composición en una determinada zona. La variable manipulada es el caudal de vapor que realiza el aporte energético al calderín de fondos, ya que regular este flujo implica ajustar el grado de separación deseado, con el fin de igualar el punto de consigna establecido.

Para medir la composición también se pueden utilizar analizadores de composición en la corriente de destilado; no obstante, esta estrategia presenta una serie de desventajas: los sensores de temperatura son dispositivos más fiables, replicantes y sobre todo mucho más económicos que el instrumental cromatográfico necesario para medir la composición. Además, la respuesta en sistema cerrado de un lazo de temperatura es mucho más rápida que un lazo de composición, teniendo en cuenta los tiempos muertos asociados a cada operación.

11.8.4.5 Lazo de control LIC-405

El último lazo de control que se utiliza para garantizar un funcionamiento correcto de la columna de destilación se destina a mantener el nivel de líquido estable en la zona de fondos, evitando inundaciones o secados que alteren la operatividad, actuando sobre el caudal de colas que se extrae de la columna. Este parámetro goza de una importancia capital, de ahí que se incluyan alarmas de alto o bajo nivel para indicar una posible inundación o secado de la columna respectivamente. Nuevamente se implementa una morfología del tipo *stand-pipe* para el control del nivel.

11.8.4.6 Lazos de control PIC-406, FIC-407, LIC-408, TIC-409 y LIC-410

La estrategia para el diseño de los lazos de control para la columna de destilación T-402, encargada de la purificación de la corriente de reciclo, es idéntica que para la torre T-401.

11.8.4.7 Lazos de control PIC-411, LIC-412, FIC-413, TIC-414 y LIC-415

Los mismos principios anteriormente introducidos se aplican a la torre T-403, destinada a la purificación de la corriente de acetato de etilo que conforma el objetivo de producción de la planta de proceso. La única diferencia se encuentra en el lazo

destinado al control del nivel en el tanque, ya que en este caso la razón de reflujo es superior a la unidad ($R_{T-403}=4.87$) y por lo tanto la mayor influencia sobre el nivel en el tambor de reflujo será ejercida por la corriente de recirculación a la columna.

11.8.4.8 Lazo de control PIC-416

El hecho de utilizar un líquido iónico como *entrainer* en la columna de destilación azeotrópica T-401 facilita enormemente el equipamiento necesario para su posterior recuperación, bastando la utilización del tambor flash V-401.

Para optimizar energéticamente el proceso, se opta por operarlo a vacío mediante el empleo de un eyector de tal manera que a la temperatura a la que se encuentra la corriente de fondos tanto el etanol como el acetaldol se vaporicen. Por ello se incluye un lazo de control de la presión en el interior del tanque flash, de manera similar al introducido en el tambor V-301.

11.8.4.9 Lazo de control LIC-417

Con el propósito de evitar una inundación de líquido iónico en el seno del tanque flash V-401 se introduce un lazo de control de nivel que actúa sobre la corriente de fondos del tambor, a través de la cual fluye el metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio no volátil.

11.8.4.10 Lazo de control TIC-418

Se utiliza para regular la operación del condensador E-401, que se introduce con el fin de alimentar una corriente líquida a la T-402. En función de la temperatura de la corriente de salida, el controlador actúa sobre la válvula que regula el paso de refrigerante en el intercambiador de calor, aumentando o disminuyendo la tasa de transmisión de calor al modificar el caudal.

11.8.4.11 Indicadores manuales en el reciclo de líquido iónico

Para la corriente de recirculación del líquido iónico es necesario modificar sus condiciones de presión y temperatura. Puesto que ambos cambios son pequeños, se disponen indicadores TI-419 y PI-420 que muestran al operador los valores en cada instante. No disponen de controlador y la única manera de actuar sobre ellos es mediante la operación manual de las válvulas correspondientes.

12. Normas y referencias

12.1 Legislación relativa a la seguridad industrial

12.1.1 Legislación europea

- Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y por la que se modifica y deroga la Directiva 96/82/CE (SEVESO III).
- Reglamento (CE) nº 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo del 18 de diciembre del 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).
- Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (Reglamento CLP).
- Directiva 2014/34/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (ATEX).

12.1.2 Legislación nacional

- Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz Básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- Real Decreto 339/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
- Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de Alta Tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC-RAT 01 a ITC-RAT 23).
- Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE-APQ-1 hasta MIE-APQ-7.
- Real Decreto 105/2010, de 5 de febrero, por el que se modifican determinados aspectos de la regulación de los almacenamientos de productos químicos y se aprueba la instrucción técnica complementaria MIE-APQ-9 de almacenamiento de peróxidos orgánicos.

- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento Electrotécnico para instalaciones de Baja Tensión.
- Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales.
- Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento e instalaciones de protecciones contra incendios.

12.2 Legislación relativa a la seguridad e higiene laboral

12.2.1 Legislación europea

- Reglamento (UE) 2016/425 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2016, relativo a los equipos de protección individual y por el que se deroga la Directiva 80/686/CEE del Consejo.
- Directiva 92/58/CEE del Consejo, de 24 de junio de 1992, relativa a las disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y de salud en el trabajo.
- Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas (ATEX).

12.2.2 Legislación nacional

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales (PRL).
- Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización de equipos de protección individual (EPIs) por parte de los trabajadores.
- Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para el uso de los equipos de trabajo por parte de los trabajadores.
- Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.

- Real Decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyan pantallas de visualización.
- Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.
- Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas (ATEX) en el lugar de trabajo.
- Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.

12.3 Legislación medioambiental

12.3.1 Legislación europea

- Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre emisiones industriales (Prevención y Control Integrados de la Contaminación).
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
- Decisión 2006/507/CE del Consejo, de 14 de octubre de 2004, relativa a la firma en nombre de la Comunidad Europea del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes.

12.3.2 Legislación nacional

- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- Real Decreto – ley 5/2004, de 27 de agosto, por el que se regula el régimen del comercio de Derechos de Emisión de gases de efecto invernadero.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, acerca de las cuestiones relativas al Ruido.
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión el ruido ambiental.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

12.4 Normas de construcción

Normas Básicas de Edificación – Normas Tecnológicas de Edificación (NBE-NTE). Real Decreto 3565/1972 (B.O.E de 15 de enero de 1973) corregido por Real Decreto 1650/1977, de 9 de julio de 1977:

- NBE-CPI/97: condiciones de Protección contra Incendios.
- NBE-EA: estructuras de acero.
- NBE-MV 102: ejecución de las estructuras de acero laminado en edificación.
- NBE-MV 103: acero laminado para las estructuras de edificación.
- NTE-CSS: cimentaciones superficiales corridas.
- NTE-CSZ: cimentaciones superficiales, zapatas.
- NTE-EH: estructuras de hormigón.
- NTE-EME: estructuras de madera. Encofrados.
- NTE-IEI: iluminación interior.
- NTE-IEP: puesta a tierra.
- NTE-IER: instalaciones eléctricas. Red exterior.
- NTE-IIE: iluminación exterior.

12.5 Códigos de diseño generales

- UNE (Una Norma Española)
- ASME (*American Society of Mechanical Engineers*)
- TEMA (*American Tubular Exchanger Manufacturers Association*)
- DIN (*Deutsches Institut für Normung*)
- BS (*British Standards*)

13. Seguridad en diseño y en la operación

En este último apartado de la memoria se elabora un inventario de todas las sustancias químicas que intervienen de manera directa o indirecta en el proceso de producción, estableciendo las cantidades que aparecen y recopilando información acerca de parámetros termodinámicos de inflamabilidad y peligrosidad.

Por otro lado, se estipulan las distancias de seguridad a la que se deben situar los equipos, se realiza un estudio de reactividad química descontrolada teniendo en cuenta matrices de compatibilidad química y se incluyen los cálculos para el dimensionamiento de la válvula de alivio y se incluye un análisis elemental de los riesgos mediante un método cuantitativo como el índice DOW de fuego y explosión del reactor R-201, al ser considerado el punto crítico del proceso.

13.1 Inventario de sustancias

Se llevará a cabo un inventario de sustancias que se encuentran presentes en el proceso de producción, comprobando los umbrales de cantidades de las mismas establecidas por la propia normativa, para así determinar si se trata de una instalación clasificada según la Normativa Seveso (50). Se deben tener en cuenta, asimismo, las propiedades termodinámicas relacionadas con su inflamabilidad. Con el fin de facilitar la comprensión de las mismas, tratando de salvar la ambigüedad de los nombres, se definen a continuación los siguientes conceptos:

- Punto flash: la más baja temperatura a la cual los vapores formados a partir de un líquido pueden arder.
- Temperatura de autoignición: temperatura a partir de la cual una sustancia se puede incendiar sin presencia de una fuente de ignición (chispa eléctrica, llama o calor).
- Límite inferior de inflamabilidad: la más baja concentración de gas/vapor, definida como % en volumen de la sustancia en el aire, que produce un incendio flash en presencia de una fuente de ignición.
- Límite superior de inflamabilidad: la más alta concentración de gas/vapor, definida como % en volumen de la sustancia en el aire, que produce un incendio flash en presencia de una fuente de ignición.

Tabla 18: Propiedades termodinámicas a considerar para el inventario de sustancias (51)

Sustancia	Punto flash (°C)	T autoignición (°C)	Límite inferior	Límite superior
Etanol	13.3	363	3.3	19
Acetaldehído	-38	185	4	60
Acetato etilo	7	427	2.2	11.5
Hidrógeno	Gas inflamable	500-571	4	76
Acetaldol	65	250	2.1	14.1

Para completar el inventario, se refleja la clasificación de cada una de las sustancias según el reglamento CLP en la tabla 19.

Tabla 19: Inventario de sustancias según Reglamento CLP (52)

Compuesto	Nº CAS	Propiedades	Categoría
Etanol	64-17-5	Líquido inflamable 2	P5a,P5b,P5c
		Líquido inflamable 1	P5a
Acetaldehído	75-07-0	Irritación ocular 2	-
		Irritación respiratoria 3	-
		Posible carcinógeno 2	-
		Líquido inflamable 2	P5a,P5b,P5c
Acetato etilo	141-78-6	Irritación ocular 2	-
		Irritación respiratoria 3	-
Hidrógeno	1333-74-0	Gas inflamable 2	P2
Acetaldol	107-89-1	Toxicidad aguda 2	-
		Irritación ocular 2	-

Como ampliación de la información aquí presentada se incluyen las fichas de seguridad (*MSDS: material safety data sheet*) de todas las sustancias químicas en el anexo V de la memoria del presente proyecto, que han de cumplir los requisitos establecidos en el punto 6 del artículo 31 contenido en el Título IV: Información en la cadena de suministro del Reglamento (CE) 1907/2006, de 18 de diciembre, del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y preparados químicos (REACH), por el que se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos, se modifica la Directiva 1999/45/CE y se derogan el Reglamento (CEE) 793/93 del Consejo y el Reglamento (CE) 1488/94 de la Comisión así como la Directiva 76/769/CEE del Consejo y las Directivas 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE y 2000/21/CE de la Comisión.

13.2 Clasificación NFPA de las sustancias

Una vez inventariadas las sustancias presentes en la planta de proceso se realiza la clasificación NFPA (*National Fire Protection Association*) para ser conscientes de todos los peligros asociados a los diferentes compuestos involucrados. El diagrama de fuego (*Fire Diamond*) de esta prestigiosa institución estadounidense presenta cuatro categorías con diferentes colores asociados a inflamabilidad (rojo), toxicidad (azul), reactividad (amarillo) y características más representativas (blanco). De un modo más gráfico, se explicita esto empleando la figura 35.

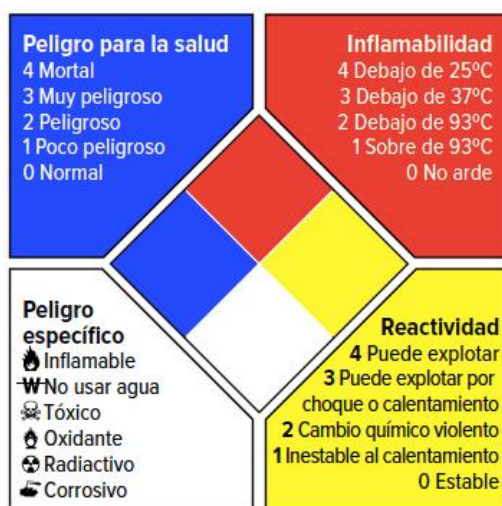


Figura 35: Pictograma explicativo del diagrama de fuego NFPA

Considerando este tipo de cuadro de identificación, la clasificación del inventario de sustancias del proceso se resume en la tabla 20.

Tabla 20: Clasificación NFPA de las sustancias inventariadas (51)

Sustancia	Peligro salud	Inflamabilidad	Reactividad	Peligro específico
Etanol	0	3	0	-
Acetaldehído	2	4	2	-
Acetato etilo	1	3	0	-
Hidrógeno	0	4	0	-
Acetaldol	3	0	0	-

13.3 Clasificación de la instalación según Directiva Seveso

El Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas tiene como objeto la prevención de este tipo de contingencias, así como la limitación de sus consecuencias sobre la salud humana, los bienes y el medio ambiente, tal y como se define en el artículo 1 del RD (50).

En el artículo 2 del RD 840/2015 se hace referencia al ámbito de aplicación del mismo, centrándose principalmente en las excepciones; puesto que la planta de producción de acetato de etilo no cumple los requisitos para ser considerada como excepción, es susceptible de cumplir las disposiciones del Real Decreto tal y como se define en el artículo 3, donde se introduce el concepto de establecimiento del siguiente modo: “la totalidad del emplazamiento bajo el control de un industrial en el que se encuentran sustancias peligrosas en una o varias instalaciones, incluidas las infraestructuras o actividades comunes o conexas”. Los emplazamientos se pueden clasificar en dos ramas según la cantidad de sustancias peligrosas (empleando en ambos casos, cuando sea aplicable, la regla de la suma de la nota 4 del anexo I):

- Establecimiento de nivel inferior: un establecimiento en el que haya presentes sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores al umbral inferior (columna 2 de la parte 1 o 2 del anexo I), pero inferiores a las cantidades asociadas al umbral superior (columna 3 de la parte 1 o de la parte 2 del anexo I).
- Establecimiento de nivel superior: un establecimiento en el que haya presentes sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores a las especificadas al umbral superior.

Por ello, para clasificar la instalación según la Normativa Seveso es necesario presentar la cantidad existente en el emplazamiento para cada una de las sustancias presentes en el proceso productivo, así como los umbrales inferiores y superiores registrados en el anexo I del RD. Las sustancias se recogen en categorías de peligro en conformidad con el reglamento (CE) 1272/2008, de 16 de diciembre, del Parlamento Europeo y del Consejo sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, por el que se modifican y derogan las Directivas 67/548/CEE y 1999/45/CE y se modifica el Reglamento CE 1907/2006 (comúnmente conocido con el nombre de Reglamento CLP).

Por tanto, solo se recogen las sustancias que están clasificadas como peligrosas en este reglamento, ya que el resto no dispone de umbrales. Las sustancias clasificadas son aquellas que en la tabla 19 están asociadas a una categoría; los umbrales respectivos se recogen en la tabla 21.

Tabla 21: Sustancias peligrosas y umbrales para la clasificación según Directiva Seveso

Compuesto	Categoría límite CLP	Umbral inferior (t)	Umbral superior (t)	Cantidad en proceso (t)	¿Clasificado?
Etanol	P5a	10	50	484.81	Sí
Acetaldehído	P5a	10	50	10.22	-
Acetato etilo	P5a	10	50	454.95	Sí
Hidrógeno	P2	5	50	21.21	-

Para reactivos (etanol y acetaldehído) y productos (acetato de etilo e hidrógeno) se considerará el almacenamiento de tres días de producción como cantidad existente en la planta. Se puede observar en la tabla 21 como hay sustancias peligrosas en una cantidad superior a los umbrales establecidos, por lo que la instalación queda clasificada según la Directiva Seveso.

13.4 Estudio de reactividad química descontrolada

En este apartado se realiza un análisis preliminar sobre el sistema reactivo y la probabilidad de que se desarrollen reacciones fuera de control (*runaway reactions*) que pongan en peligro la integridad de la instalación y constituyan un riesgo para el personal de planta, otras personas o el medio ambiente.

La reactividad química se produce en las plantas de proceso siguiendo dos posibles esquemas: sustancias reaccionando por diseño de la propia planta, que adaptado al presente documento, sería la deshidrogenación de etanol para dar acetato de etilo e hidrógeno en el reactor catalítico multitubular de lecho fijo o por accidente, causados principalmente por desajustes en las condiciones nominales de operación.

Por tanto, este estudio básico se centrará en este último punto: aquellas situaciones con el potencial de desarrollar una reacción química descontrolada: polimerización, descomposición, reacciones violentas con el agua, reacciones violentas con el aire y finalmente incompatibilidad química. Los dos principales parámetros termodinámicos destinados al estudio básico de la reactividad química son las entalpías de reacción y de descomposición de cada uno de los compuestos (53).

13.4.1 Método CHETAH

Se trata de un método desarrollado por el ASTM que predice desde un enfoque teórico la estabilidad intrínseca de las sustancias, o lo que es lo mismo, el potencial de una sustancia para la liberación de energía de manera violenta. El propio ASTM ha desarrollado un software en forma de base de datos Access que proporciona valores para las entalpías de descomposición -siguiendo un método de adición de grupos de Benson- y de reacción.

La entalpía de formación (o descomposición) proporciona información acerca de la estabilidad termodinámica con respecto a los elementos que forman el compuesto en cuestión. De hecho, muchos explosivos son estables con respecto a sus compuestos elementales pero son altamente inestables con respecto a productos de reacción mucho más simples. Un valor positivo de la entalpía de formación proporciona un primer aviso acerca de un potencial peligro; un valor negativo de ΔH_f no supone nada en estos términos. Por otro lado, la entalpía de reacción está relacionada con la cantidad de energía química “almacenada” y por ello, también es un parámetro susceptible de ser relacionado con el peligro potencial.

El método se basa en 3 criterios: concentración de energía química, probabilidad y el criterio Y. El primero de ellos está relacionado con lo citado en el anterior párrafo, tal y como se recoge en la tabla 22 a modo de explicación:

Tabla 22: Criterio de concentración de energía química según el método CHETAH

Riesgo	ΔH_d (kcal/g)	Comentario
Alto	Mayor que 0.7	Muy exotérmico, probable detonación
Medio	0.3-0.7	Exotérmico, posibles detonación & deflagración
Bajo	0.1-0.3	Posible deflagración
Muy bajo	Menor que 0.1	Propagación poco probable

Llegados a este punto es conveniente diferenciar los conceptos de detonación y deflagración: el primero de ellos se refiere a una combustión supersónica que implica la existencia de una onda expansiva y una zona de reacción detrás de ella; por contra, en la deflagración el frente de reacción avanza en la sustancia sin reaccionar a una velocidad menor que la del sonido. Se suele asociar erróneamente con las explosiones, usándose a menudo como sinónimo.

El criterio de probabilidad hace alusión a si una sustancia posee suficiente oxidante en su estructura molecular de tal manera que proporcione productos de oxidación estables. La manera de estudiar la reactividad química descontrolada según este criterio se basa en relacionar las entalpías de combustión y descomposición, como se indica en la tabla 23.

Tabla 23: Criterio de probabilidad según el método CHETAH

Riesgo	$\Delta H_c/\Delta H_d$
Alto	0-3
Medio	3-5
Bajo	Mayor que 5

Estos dos primeros criterios se pueden combinar de tal manera que se pueda evaluar la probabilidad de reacciones de descomposición con carácter explosivo. Finalmente, el criterio Y cuantifica la energía liberada en la descomposición de una sustancia referida al número de átomos de la molécula en cuestión. Si $Y > 110$ el riesgo de un potencial peligro es elevado, siendo el riesgo bajo si $Y < 30$.

$$Y = \frac{10 \cdot \Delta H_d^2 \cdot M_m}{N} \quad (16)$$

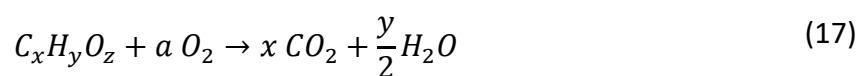
siendo M_m la masa molecular, ΔH_d la entalpía de descomposición (en kcal/g) que es positiva para procesos exotérmicos y N el número de átomos. Estos tres criterios en los que se basa el método CHETAH se aplican únicamente a procesos exotérmicos; puesto que en el reactor R-201 la reacción global es endotérmica no será necesario aplicarlos. Sin embargo, se aplicará otra forma de estudio básico, introducida por Lothrop y Handrick⁴ en 1949, que también permitirá analizar la estabilidad de las sustancias basándose en su estructura molecular.

⁴ LOTHROP W, HANDRICK R. Chemical Reviews 44, 3, 419-445, 1949. DOI: 10.1021/cr60139a001

13.4.2 Método de balance de oxígeno

Mediante esta metodología se computa el riesgo a través del cálculo del aporte de oxígeno externo que es necesario para que la sustancia se pueda oxidar completamente, de tal manera que cuanto mayor oxígeno contenga la estructura molecular mayor será el riesgo dado que requiere de menos O₂ externo para que se produzca la combustión.

Este método se aplica a moléculas del tipo C_xH_yO_z y debe considerarse que el suministro externo de oxígeno debe realizarse en forma destinada a la reacción (O₂) y no en moléculas en las cuales se encuentre estabilizado (CO₂ o H₂O, por ejemplo). Partiendo del balance de materia realizado a la reacción de combustión se puede llegar a la fórmula que permite evaluar el riesgo mediante este criterio básico:



$$BO (\%) = \left(z - 2x - \frac{y}{2} \right) \frac{16}{M_m} \cdot 100 \quad (18)$$

donde M_m representa la masa molecular de la sustancia analizada.

Según la propia definición, si la molécula dispone de menos oxígeno del necesario el balance de oxígeno es negativo, mientras que si posee más es positivo. La zona de peligro se produce cuando no es necesario suministro externo de oxígeno para que se produzca la combustión, mientras que si hay exceso o defecto disminuye el riesgo, como se puede observar en la tabla 24:

Tabla 24: Cuantificación del riesgo según el criterio del balance de oxígeno

Riesgo	Valor del balance de oxígeno (%)
Alto	-120 < OB < 80
Medio	-240 < OB < -120 & 80 < OB < 160
Bajo	OB < -240 & OB > 160

Finalmente, se aplica este criterio a las moléculas del tipo C_xH_yO_z existentes en el proceso que explica el presente documento. Los resultados cuantitativos se sintetizan en la tabla 25, los cuales permiten determinar el riesgo desde un punto de vista cualitativo:

Tabla 25: Riesgo intrínseco de las sustancias según el criterio del balance de oxígeno

Sustancia	BO (%)	Riesgo
Etanol (C ₂ H ₆ O)	-208.39	Medio
Acetaldehído (C ₂ H ₄ O)	-181.60	Medio
Acetato etilo/acetaldol (C ₄ H ₈ O ₂)	-181.61	Medio

En base a los resultados obtenidos, se puede inferir que el sistema reactivo del proceso posee un riesgo medio-bajo según el método de Lothrop y Handrick del balance de O₂.

13.4.3 Matriz de compatibilidad química

Los problemas de reactividad química en una planta de proceso también se pueden deber a cuestiones de incompatibilidad química entre dos o más sustancias que se mezclan en un determinado momento. Para estudiar las posibles interacciones que pueden ocurrir entre los compuestos se utiliza la matriz de compatibilidad química, cuya elaboración tiene en cuenta la información proporcionada por el diamante de fuego NFPA. Esta matriz de relación, presentada en la figura 36, se ha construido empleando el software Chemical Reactivity Worksheet 4.0, desarrollado por el AIChE (Instituto Americano de Ingenieros Químicos).

NFPA				Planta de producción de acetato de etilo (TFG) Compatibility Chart		ACETALDEHYDE	ACETALDOL	ALCOHOL	ETHYL ACETATE	HYDROGEN
Health	Flammability	Instability	Special							
2	4	2		ACETALDEHYDE		SR				
3	2	1		ACETALDOL		N				
2	3	0		ALCOHOL		C	C			
1	3	0		ETHYL ACETATE		C	Y	Y		
0	4	0		HYDROGEN		N	C	C	Y	

Figura 36: Matriz de compatibilidad química (elaboración propia en CRW 4.0)

Se pueden observar ciertas incompatibilidades, las cuales se detallan a continuación:

- Acetaldehído-acetaldehído (autopolimerizable): el acetaldehído reacciona consigo mismo según reacciones de polimerización cuando el monómero se encuentra en el punto de congelación. Puesto que es un proceso en el que nunca se alcanzan temperaturas tan bajas, esta incompatibilidad no supone ningún problema.
- Acetaldol-acetaldehído (incompatible): reacción exotérmica a temperatura ambiente. No obstante, es una reacción catalizada en medio básico, lo cual debilita la importancia de esta incompatibilidad, ya que el medio de trabajo a lo largo de la planta es eminentemente ácido. Además, la cantidad relativa de acetaldol que se forma es muy pequeña (la selectividad de la reacción secundaria es inferior al 2%) con respecto a los flujos de trabajo.
- Hidrógeno-acetaldehído (incompatible): reacción exotérmica a temperatura ambiente que puede liberar productos gaseosos y causar presurización. Los dos son los productos de la reacción de deshidrogenación del etanol, y el acetaldehído formado reacciona con el etanol en exceso para dar acetato de

etilo, por lo que el perfil de composición de acetaldehído a lo largo del reactor sigue una trayectoria descendente, de ahí que se pueda salvar esta incompatibilidad aprovechando la propia dinámica del proceso.

13.5 Identificación de peligros y análisis de riesgos

Para este tipo de instalaciones medianamente complejas, la identificación de peligros y el análisis de riesgos requiere considerar todas las variables que condicionan el proceso, estudiando las posibles variaciones que se puedan producir como consecuencia de potenciales errores, además de la capacidad de respuesta de la instalación teniendo en cuenta sus características y los elementos de seguridad que la conforman. El entramado de causas y consecuencias de estas alteraciones es altamente complejo, por lo que no resulta una tarea sencilla.

Así, para llevar a cabo el estudio de seguridad de un determinado proceso químico se necesita de un equipo formado por técnicos que conocen las características y el modus operandi de la instalación, así como del proceso que se desarrolla. Para simplificar ligeramente la labor, se recurre a metodologías sistemáticas de análisis, que facilitan la reflexión y el estudio en profundidad. Una de las más utilizadas a nivel industrial es la técnica HAZOP (*HAZard and OPerability Analysis*), que identifica los problemas de operabilidad debido a desviaciones del proceso de su condición nominal de operación.

El enfoque de este método se basa en una serie de preguntas y respuestas estándar para identificar las posibles desviaciones, con la finalidad de inferir los factores que evitan que el sistema funcione según los objetivos de diseño. El diagrama de tuberías e instrumentación se divide en diferentes partes, que reciben el nombre de nodos, donde se aplica la técnica empleando palabras-guía, que se recogen a modo de resumen en una tabla a continuación ('mayor que', 'menor que'...), que acompañan a cada variable que incide sobre el proceso: caudal, nivel, presión, temperatura... con el propósito de determinar las causas asociadas a las consecuencias, es decir, las anomalías con respecto al régimen estacionario de operación. Las palabras guía de uso más frecuente en la metodología HAZOP se explican en la tabla 26.

Tabla 26: Palabras guía utilizadas frecuentemente en el método HAZOP y su significado

Palabras guía	Significado
NO	Ausencia de las especificaciones de diseño
MÁS/MENOS	Aumento/disminución de cantidades de medición: flujo...
MAYOR QUE/ASÍ COMO	Aumento cualitativo, se realiza una actividad adicional
PARTE DE	Disminución cualitativa, se realiza una parte de la función
DE OTRA FORMA	Sustitución completa de la función deseada
INVERSO	Oposición a la función deseada: flujo de retroceso...

A modo de conclusión, tomando como referencia el registro histórico de accidentes en plantas de proceso, las causas de los mismos se pueden clasificar atendiendo a tres grupos diferentes:

- Fallos de componentes: bien sea por diseño inapropiado frente a presión, temperatura o corrosión, por fallos de elementos de impulsión, de juntas y conexiones. Además, también es posible que fallen los sistemas de control (bien sea el elemento primario, el controlador o el elemento final) o los sistemas específicos de seguridad (válvulas de seguridad, sistemas de alivio de presión o alarmas).
- Desviaciones en las condiciones normales de operación: perturbaciones externas de los parámetros que rigen el correcto funcionamiento del proceso, insuficiente enfriamiento para reacciones exotérmicas que deriva en reacciones del tipo *runaway*, fallos en las conducciones o valvulería del circuito de aire comprimido destinado a instrumentación, ausencia de inertes cuya finalidad es la de actuar como balón térmico o corte del suministro eléctrico.
- Errores de organización y humanos: fallos en la adición manual de componentes químicos, desconexión de sistemas de seguridad debido a un sistema de alarmas integrado de manera defectuosa, recortes en personal o recortes en utilidades destinadas a refrigeración/calefacción de determinados compuestos.

13.6 Dimensionamiento válvulas de alivio

A pesar de las numerosas precauciones de seguridad adoptadas en el contexto de una planta de proceso química, como ya se ha visto es posible que se den circunstancias que eleven la presión del proceso por encima de los límites de seguridad; si este incremento de la presión es muy elevado puede exceder la resistencia a la tracción de las conducciones y los recipientes, derivando en la pérdida en forma de fugas de grandes cantidades de compuestos químicos, que pueden ser tóxicos o inflamables.

Estas medidas de seguridad son muchas y muy diversas, teniendo en cuenta que los procesos químicos son intrínsecamente poco seguros: elección de los componentes adecuados y de una ruta de reacción factible, de materiales de construcción compatibles y montándolos bajo los estándares vigentes sujetos a rigurosos controles de calidad. Los elementos y sistemas de control tienen que ser susceptibles al criterio del fallo seguro: en caso de falla, deben quedar en la situación más segura desde un enfoque global.

Se incluyen además válvulas de seguridad (resorte que mantiene el disco presionado contra un asiento, cerrando la salida de fluido hasta que la presión del sistema vence la presión del resorte; una vez se reestablecen las condiciones normales de presión se vuelven a cerrar) y elementos mecánicos para el alivio de presión, como discos de ruptura, que son membranas diseñadas para tolerar una cierta presión, por encima de

la cual se rompe, abriendo la sección de tubería en la que está instalado. Han de ser repuestos una vez utilizados, pero son más baratos y tienen un mantenimiento mucho más sencillo.

Por poner otros ejemplos, en los tanques de almacenamiento se utilizan válvulas de respiración que constan de dos orificios, para aliviar situaciones de sobrepresión o de vacío y las antorchas son el sistema más frecuentemente empleado para eliminar las corrientes de venteo.

El mantra que debe trascender es que el accidente se debe prevenir en primer lugar, diseñando una planta de producción lo más segura posible; la segunda línea de defensa la llevan a cabo los lazos de control, de tal manera que los esfuerzos se dirijan a mantener el proceso en regiones de operación segura, evitando presiones muy elevadas en la medida de lo posible. Finalmente, la última línea contra presiones excesivas consiste en instalar dispositivos de alivio para permitir la salida de gases antes de que se desarrollen episodios de sobrepresión; estos dispositivos están compuestos por la válvula de alivio y el equipamiento de proceso aguas abajo para manejar de manera segura el material emitido (55).

En este documento se diseñará la válvula de alivio asociada a la operación del reactor R-201, que se detallará en el Anexo II. Cálculos Justificativos. Como referencia se adoptará el capítulo 9. *Relief Sizing* de la referencia bibliográfica (54) de Crowl y Louvar, dos de los grandes gurús en cuestión de seguridad en los procesos químicos y la norma API 520 relativa al dimensionado, selección e instalación de dispositivos de alivio de presión en refinerías. Al tratarse de un concepto muy importante a valorar en la ingeniería de procesos posee terminología técnica propia:

- Presión de tarado: la presión a la cual el dispositivo de alivio se activa.
- Máxima presión de trabajo permisible: comúnmente mencionado como MAWP (*maximum allowable working pressure*), hace referencia a la presión de diseño que se ha tenido en cuenta para el diseño mecánico del recipiente a ser protegido por la válvula de alivio.
- Presión de operación: presión manométrica de operación con la que se trabaja en condiciones nominales de operación. Siguiendo las directrices del Código ASME BPV Sección VIII División I para recipientes a presión de pared delgada, la presión de operación es un 10% inferior a la MAWP.
- Acumulación: el incremento de presión con respecto a la máxima presión de trabajo permisible del recipiente durante la etapa de alivio; normalmente se expresa como un porcentaje de la presión de diseño.
- Sobrepresión: hace referencia al incremento de presión en el recipiente con respecto a la presión de tarado durante la etapa de alivio. Los conceptos de sobrepresión y acumulación son análogos cuando la presión de tarado se

configura a la MAWP; al igual que la acumulación, se expresa como un porcentaje de la presión de tarado.

- Contrapresión: del inglés *backpressure* hace mención a la presión en la salida de la válvula durante la etapa de alivio, que es la presión del sistema de descarga.
- *Blowdown*: diferencia de presión entre la presión de tarado y la de reseteo del dispositivo. Se expresa como un porcentaje de la primera de ellas.

El procedimiento de diseño (especificación del área necesaria) comienza con la estipulación del caudal de alivio. Posteriormente se comprobará si el flujo es crítico o no, lo cual depende de las propiedades físicas de la corriente gaseosa (relación entre el calor específico a presión constante y a volumen constante) siguiendo una correlación empírica. En función de las condiciones de la corriente a aliviar, se empleará unas expresiones u otras para la determinación del área necesaria del dispositivo de alivio, tal y como indica el 3º apartado de la norma API 520. Finalmente, se selecciona el área estándar del código API 526 que sea más cercano al área obtenida siguiendo la normativa API 526 para válvulas de alivio de presión de acero con bridas (*flanged steel*).

13.7 Distancias de seguridad

Como se ha indicado anteriormente, en las etapas de diseño debe planificarse el proceso de tal manera que este sea lo más seguro posible desde un punto de vista intrínseco. La continuación natural de esta filosofía en tanto a los aspectos de seguridad en la implantación de la planta se canaliza hacia:

- Considerar la dirección de los vientos (la rosa de los vientos muestra la frecuencia de los vientos desde diferentes direcciones), de tal manera que la planta se localice en la dirección del viento que prevalece en esa zona.
- Las distancias mínimas que hay que guardar entre equipos, de tal manera que en el caso de una desafortunada contingencia se evite la propagación de incendios.

Para determinar estas distancias mínimas se debe tener en cuenta el grado de peligrosidad del equipo y el potencial de pérdidas; las tablas de distancias mínimas establecidas por GE Global Asset Protection Services (2001): GE GAP 2.5.2/2A se suelen utilizar como referencia para este menester. En la figura 37 se recoge un diagrama que muestra las distancias de seguridad mínimas entre equipos.

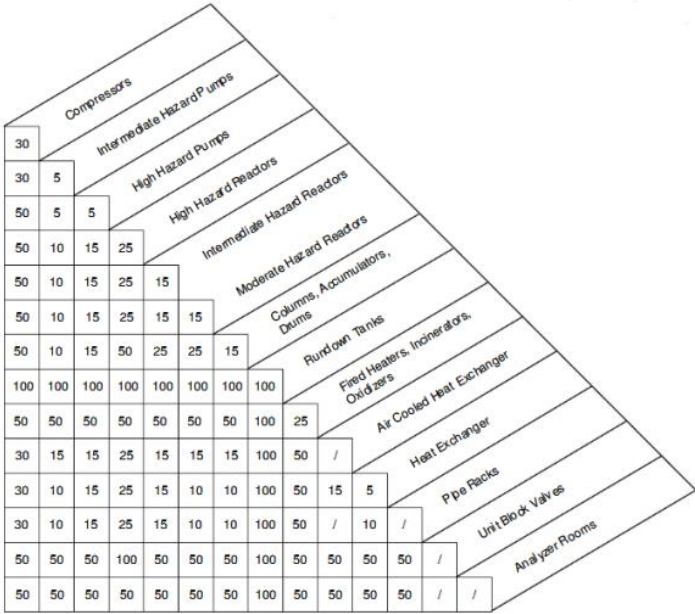


Figura 37: Distancias mínimas de seguridad recomendadas entre equipos (ft)

En segundo lugar, la planta se divide en bloques de proceso separados, cuyas distancias mínimas están establecidas por GAP 2.5.2/2A. Con este propósito es necesario clasificar las unidades de proceso -en función del riesgo a explosión y a incendios- en tres categorías de riesgo: MH (riesgo moderado), IH (riesgo intermedio) y HH (riesgo alto). Así surge el siguiente diagrama presentado en la figura 38, que representa las distancias recomendadas entre bloques dentro de una misma planta.

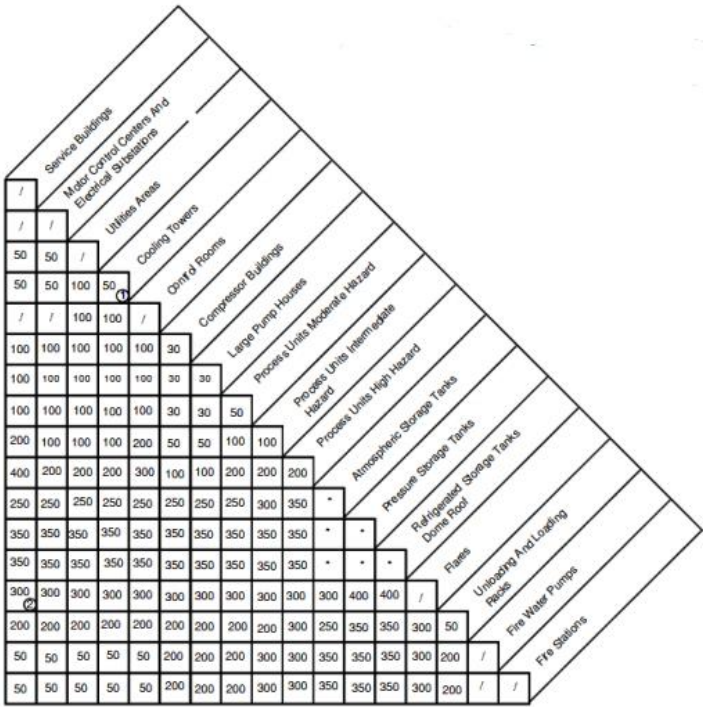


Figura 38: Distancias mínimas de seguridad establecidas entre bloques (ft)

Finalmente hay que localizar los diferentes equipos dentro de cada uno de los bloques de proceso. Estas distancias mínimas de seguridad se respetarán a la hora de realizar el diseño del *layout* de la planta de proceso, adjunto en el plano de implantación.

13.8 Índice DOW de incendio y explosión

Llegados a este punto de la memoria es importante realizar una evaluación de riesgos. Los métodos de análisis pueden clasificarse en dos categorías en función de su naturaleza: cuantitativos, que se basan en frecuencias y probabilidades, y semicuantitativos, basados en índices que consideran los factores con mayor influencia en la gravedad de los accidentes con sustancias peligrosas. A nivel industrial, el índice de mayor interés es el Índice DOW de Fuego y Explosión.

Este índice fue creado por la compañía DOW Chemical (actualmente DowDuPont Inc, la mayor compañía química del mundo en términos de ventas) con la idea de ser utilizado como guía para la selección de métodos de protección contra incendios; se trata de un método sistemático que implica una evaluación objetiva del potencial real de incendio, explosión y reactividad de equipos (y de su contenido) a partir de datos históricos de pérdidas, potencial energético del material a estudiar y el grado en que se aplican las políticas de prevención en la actualidad.

El Índice DOW tiende a determinar la máxima pérdida que puede sufrir un proceso o unidad en términos realistas con cálculos basados en datos cuantificables, al contrario que las evaluaciones llevadas a cabo por las compañías de seguros que suelen estar basadas en los peores accidentes imaginables. Como referencia para realizar los cálculos se emplea la referencia bibliográfica (55), que es una traducción autorizada del *Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide* publicado por DOW Chemical en 1980 (5ª edición).

Se realiza el cálculo del Índice DOW de incendio y explosión para el reactor catalítico heterogéneo R-201, ya que es un equipo que trabaja a elevada temperatura y presión. El algoritmo que sintetiza el procedimiento sistemático a seguir para el Sistema de Análisis de Riesgos de Incendio y Explosión se ilustra a continuación, donde se puede observar que el cálculo del Índice DOW de incendio y explosión es un paso trascendental.

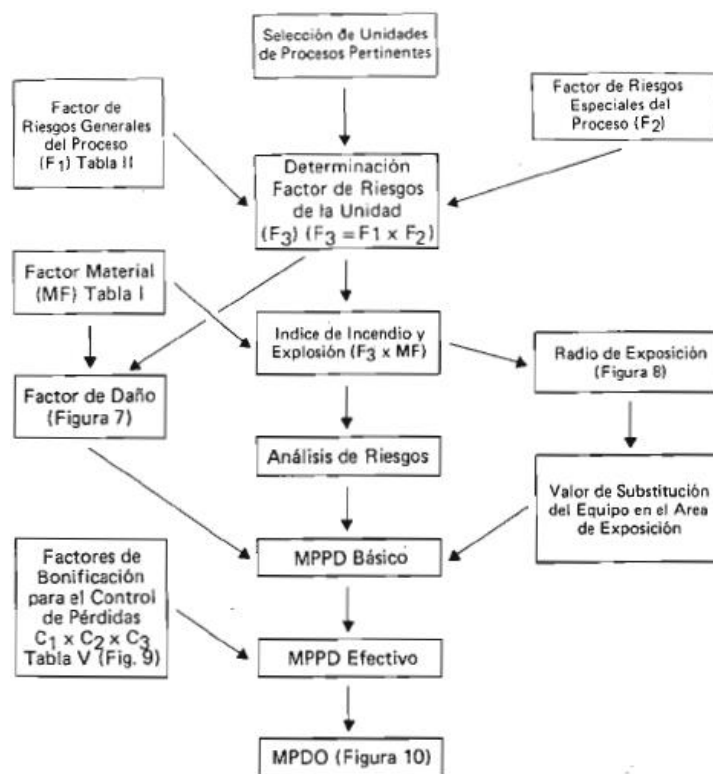


Figura 39: Pasos para la realización del Sistema de Análisis de Riesgo y Explosión (56)

Explicitando exclusivamente para el Índice DOW de incendio y explosión, se observa en la figura 39 que el primer paso consiste en la determinación del factor material (MF), que se describe como una medida de la intensidad de liberación de energía de un compuesto químico o de una mezcla de compuestos. Este factor se determina por consideración de dos riesgos del material: inflamabilidad (N_i) y reactividad (N_r), obteniendo un valor que oscila entre 1 y 40. En el apéndice A de la referencia bibliográfica (56) los factores de material para los diferentes compuestos están tabulados en función de su clasificación NFPA.

Como primera aproximación se realiza una media ponderada en términos de peso (empleando las fracciones másicas) de los compuestos de la mezcla, lo cual es válido al no reaccionar las sustancias elementales de la mezcla entre sí; al tratarse de un reactor, la composición de las corrientes de entrada y de salida son distintas, por lo que se calcula el factor de material para ambas situaciones y se escoge el más elevado.

El criterio seguido para asignar los factores materiales a los diferentes compuestos se resume en la figura 40, también disponible en (55):

		2 T_g °K	<830	4 830 - 935	3 935 - 1010	1010 - 1080	>1080
		Pico °C DTA/DSC	>400	305 - 400	215 - 305	125 to 215	<125
		NFPA 325M	$N_f = 0$	$N_f = 1$	$N_f = 2$	$N_f = 3$	$N_f = 4$
1 No Combustible	$N_i = 0$		1	14	24	29	40
$T_i > 60^\circ\text{C}$	$N_i = 1$		4	14	24	29	40
$T_i > 37,8^\circ\text{C} < 60^\circ\text{C}$	$N_i = 2$		10	14	24	29	40
$T_i < 37,8^\circ\text{C}$ $T_e > 37,8^\circ\text{C}$	$N_i = 3$		16	16	24	29	40
$T_i < 37,8^\circ\text{C}$ $T_e < 37,8^\circ\text{C}$	$N_i = 4$		21	21	24	29	40
Polvo o vapor combustible							
ST-1			16	16	24	29	40
ST-2			21	21	24	29	40
ST-3			24	24	24	29	40
Sólidos combustibles							
5 Denso >40 mm espesor			4	14	24	29	40
6 Abierto <40 mm espesor			10	14	24	29	40
7 Espuma			16				
Espuma expandida			21				

Figura 40: Guía para la determinación del factor material (55)

A pesar de que el Apéndice A no contiene el factor material para el acetadoI, se continúa la metodología de cálculo puesto que la fracción másica de este compuesto en la corriente de salida es de únicamente el 0.4%, por lo que al realizar la media ponderada se trata de un valor que va a tener muy poca influencia.

Una vez estipulado el factor material a utilizar el siguiente paso consiste en determinar el Factor de Riesgos de la Unidad, F_3 , que como se ve en la Figura 39 es la multiplicación de otros dos factores: Factor de riesgos generales del proceso (F_1) y el factor de riesgos especiales del proceso (F_2). Cada uno de los apartados indicados son considerados como factores que contribuyen al desarrollo de un incidente que puede causar un incendio o una explosión; no se puede aplicar cada apartado al reactor R-201, pero todos aquellos que sean aplicables deben evaluarse y considerar la penalización adecuada.

Así, para el reactor en cuestión se deben tener en cuenta los siguientes ítems a la hora de valorar los riesgos generales del proceso (aglutinados en el factor F_1) que aumentan la magnitud de un incidente probable. Se aplican a cierto tipo de procesos, su disposición y las condiciones de drenaje, habiendo una sección para el manejo y almacenamiento de compuestos químicos:

- Reacciones exotérmicas: para el cálculo del índice DOW de incendio y explosión se tiene en cuenta únicamente la reacción principal. En este caso, al ser una reacción de deshidrogenación será endotérmica, por lo que este factor de penalización no aplica.
- Reacciones endotérmicas: este tipo de reacciones se penalizan con 0.20 a excepción de cuando la fuente de energía para sostener la reacción es

proporcionada por la combustión de un sólido, líquido o gas, en cuyo caso la penalización es de 0.40. En el caso que aplica, el fluido calefactor es un aceite térmico a elevada temperatura, por lo que el factor de penalización será el más pequeño de los dos.

- Manejo y transferencia de materiales: en el R-201 no se realiza mezcla, carga, descarga o almacenamiento de materiales. Por lo tanto, al no haber manipulación alguna del material, no aplica factor de penalización.
- Unidades de proceso en locales cerrados: se entiende por zona cerrada aquella área que contiene tres o cuatro lados sin aberturas en la base o solamente con aberturas en dos lados de un área cerrada por los cuatro lados. En este caso, el reactor estará situado al aire libre, por lo que no aplica factor de penalización.
- Acceso: el acceso es adecuado por al menos dos de los lados de la unidad (en caso contrario aplicaría 0.35 de penalización).
- Drenajes: la reacción se lleva a cabo en fase gaseosa, de ahí que no sean necesarios drenajes y que no se considere ninguna penalización en este aspecto.

En lo tocante a los riesgos especiales del proceso (agrupados en el factor F_2) se incluyen los ítems contribuyentes a los incidentes que aumentan la probabilidad de un incendio o explosión. Se tienen en cuenta los siguientes puntos para el cálculo del factor correspondiente:

- Temperatura de proceso: puesto que la temperatura de operación (220°C) es mayor que la temperatura de autoignición de uno de los compuestos elementales de la mezcla reaccionante (ver Tabla 18), los materiales pueden entrar en ignición sin llama o chispa por contacto con superficies calientes. Por ello aplica la penalización más elevada, 0.75.
- Presión baja: se aplica en aquellos supuestos en que una entrada de aire dentro del sistema puede causar un riesgo. Ello puede ocasionar el contacto del aire con materiales sensibles a la humedad o al oxígeno o bien a la formación de mezclas inflamables. La penalización se aplica cuando el equipo de proceso opera a presión inferior a la atmosférica.
- Operación en condiciones de inflamabilidad o cercanas a ella: las penalizaciones solamente son aplicables cuando en operación entra una mezcla de aire al sistema produciendo una mezcla inflamable y así creando un riesgo. No es el caso del reactor R-201.
- Explosión de polvo: al no manejar material pulvuruliento, no aplica en este caso.
- Presión de alivio: cuando se opera a presión superior a la atmosférica, se debe penalizar para compensar la exposición en función del incremento de presión. Para determinar el coeficiente de penalización se parte de la presión de tarado de la válvula de alivio (un 5% superior a la presión de operación). El valor

obtenido en la figura 41 (la presión manométrica de tarado es aproximadamente 290 psig, que se corresponde con un factor de 0.51) para la penalización ha de multiplicarse por 1.2 puesto que se trata de gases comprimidos.

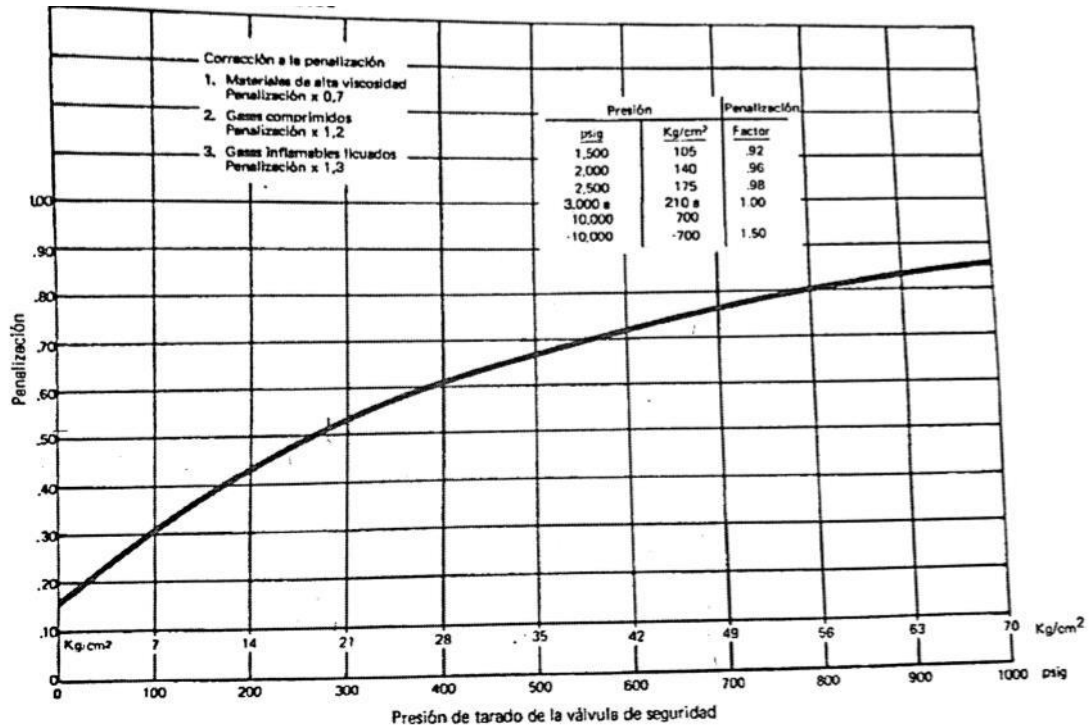


Figura 41: Penalización aplicable por trabajar a presión superior a la atmosférica (55)

- Baja temperatura: el propósito de esta clasificación es tener en cuenta la posible fragilidad del acero al carbono cuando se opera a la temperatura de transición (10°C aprox.) o inferior. Los ensayos han mostrado que mientras no se opere a temperaturas inferiores a ésta, no es necesaria penalización alguna.
- Cantidad de material inflamable para líquidos o gases en proceso: esta sección valora la exposición adicional de un área cuando aumentan las cantidades de materiales inflamables. En el caso del reactor en cuestión, se infiere el material a partir del tiempo de residencia (aproximadamente 95 segundos). Posteriormente se multiplican los kilos de material por la entalpía de combustión (en Mcal/kg), que para los diferentes compuestos está recogida en el Apéndice A. La penalización se obtiene en el punto de intersección con la curva que muestra la figura 42, con un valor de 0.15.
- Corrosión y erosión: puesto que se trabaja con fluidos poco corrosivos (esta consideración también se realiza a la hora del diseño mecánico) se selecciona la penalización más pequeña posible (0.1)
- Fugas – uniones y empaquetaduras: para seleccionar el factor de penalización la decisión se justifica en base a las soldaduras estipuladas en el diseño

mecánico. Puesto que se escoge una eficiencia del 100%, el factor es el que menos penaliza (0.1).

- Uso de calentadores con fuego directo: la existencia de equipos con fuego directo en una planta de procesos añade una exposición suplementaria a la probabilidad de ignición ante fugas de vapores inflamables. En este caso, el método de calefacción no implica fuego, por lo que el factor de penalización no aplica.

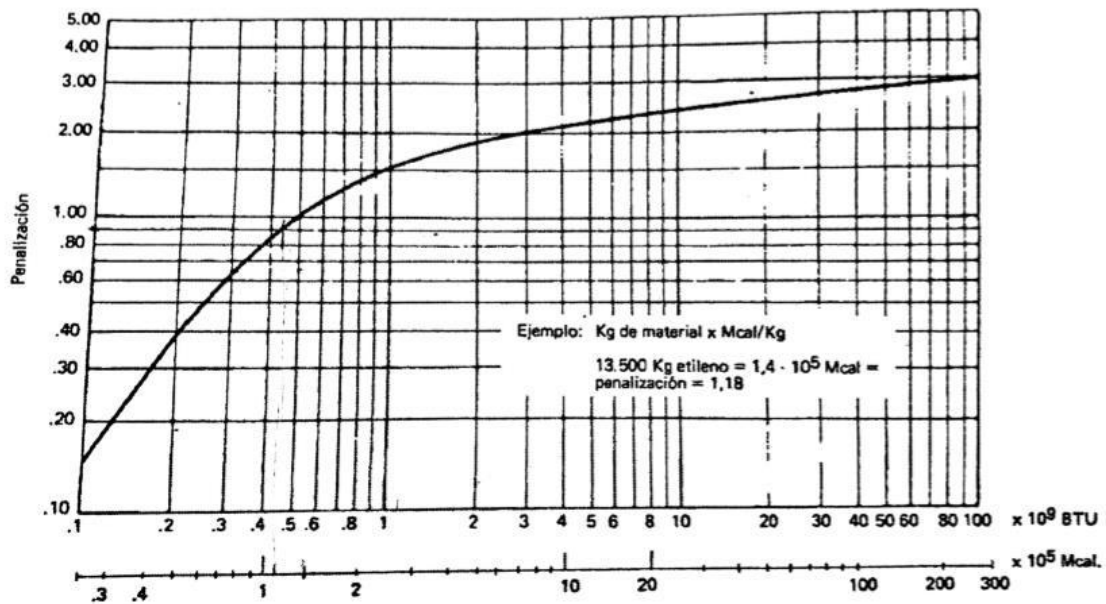


Figura 42: Gráfica de penalización para el criterio de cantidad de fluido inflamable en proceso (55)

- Sistemas de intercambio térmico con aceite caliente: los sistemas de transmisión de calor que emplean un combustible líquido como medio de intercambio térmico presentan un riesgo de incendio adicional cuando se opera a temperatura superior al punto de inflamación del combustible. En algunos procesos el mayor riesgo de incendio puede ser debido al sistema de transferencia de calor; no en este caso, debido a la gran estabilidad térmica del Dowtherm Q. Puesto que se trabaja a una temperatura superior al punto flash y la cantidad en litros que alberga la carcasa del reactor es superior a 38000 L la penalización que aplica es de 0.5.
- Equipos en rotación: puesto que en el seno del reactor no se utilizan equipos de impulsión centrífuga como bombas o compresores, este factor de penalización no aplica.

Una vez se dispone del factor de riesgos generales del proceso (F_1) y del factor de riesgos especiales del proceso (F_2), ambos se multiplican y se obtiene el factor de riesgo de la unidad (F_3), que presenta un rango de valores de 1 a 8 y es una medida de la magnitud del deterioro probable relativo debido a la exposición combinada de los factores contribuyentes empleados en el cálculo.

El Índice DOW de incendio y explosión se calcula multiplicando el factor material y el factor de riesgo de la unidad. El resultado obtenido, así como los cálculos intermedios, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 27: Índice DOW del reactor R-201

Parámetro	Valor
Factor material	16.42
F ₁	1.2
F ₂	3.21
F ₃	3.85
Índice DOW de incendio y explosión	63.29

que se corresponde con un grado de peligro ligero-moderado con la potencialidad de afectar al equipamiento situado en un radio inferior a 15 m, según la correlación gráfica mostrada en la figura 43. Según lo estipulado en el plano de implantación, se verían afectados la válvula de expansión VLV-301 y el intercambiador de calor E-201 perteneciente al circuito cerrado de fluido calefactor.

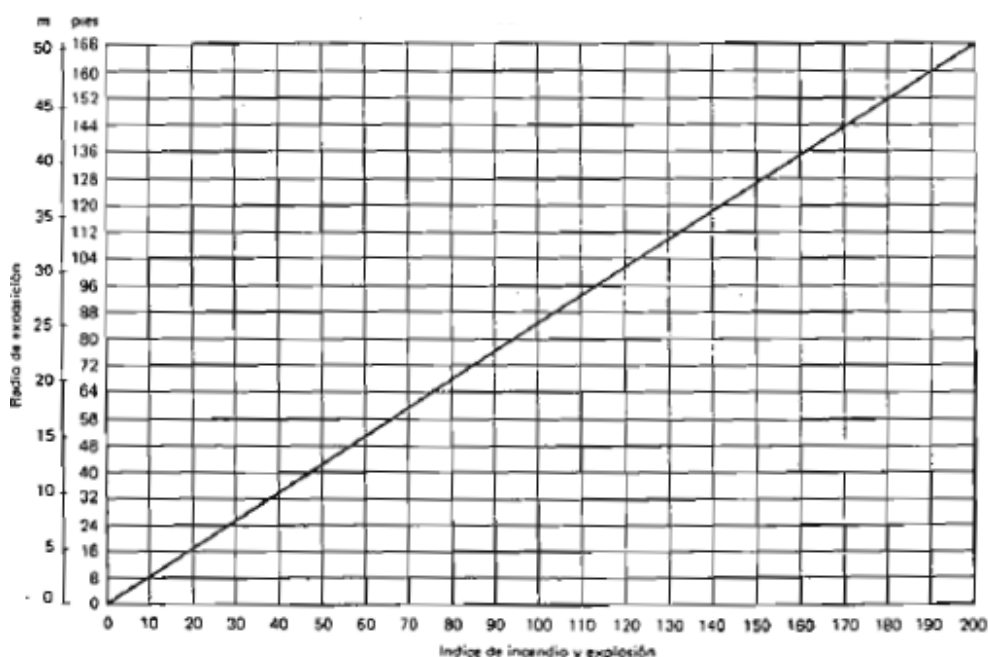


Figura 43: Área de exposición de un determinado equipo en función de su IIE (55)

14. Bibliografía

- [1] WIKIPEDIA, LA ENCICLOPEDIA LIBRE. *Etanoato de etilo*. [sitio web, consultado en febrero 2018]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Etanoato_de_etilo
- [2] ELAM, Edward U. Esters, organic. En: KIRK-OTTMER. *Encyclopedia of chemical technology*. 2ª edición. New York: John Wiley & Sons, 1965, volumen 8, pp. 365-382. ISBN 63-14348.
- [3] PUBCHEM, OPEN CHEMISTRY DATABASE. *Ethyl acetate*. [sitio web] Bethesda, USA [consultado en febrero 2018]. Disponible en: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/ethyl_acetate#section=Information-Sources
- [4] RIEMENSCHNEIDER, Wilhelm. Esters, organic. En: ULLMANN. *Encyclopedia of industrial chemistry*. 5ª edición. Weinheim (RFA): VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987, volumen A 9, pp. 565-585. ISBN 3-527-20109-2.
- [5] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA. *Ethyl acetate*. [sitio web, consultado en febrero 2018]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Ethyl_acetate
- [6] GLOBAL MARKET INSIGHTS. *Ethyl Acetate Market size, Industry Analysis Report, Regional Outlook (U.S, Germany, UK, Italy, Russia, China, India, Japan, South Korea, Brazil, Mexico, Saudi Arabia, UAE, South Africa), Application Development Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2017-2024*. [sitio web] Delaware, USA [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/ethyl-acetate-market>
- [7] IHS MARKIT. *Alkyl Acetates: Chemical Economics Handbook*. [sitio web] Londres, publicado en agosto 2016. [consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <https://ihsmarkit.com/products/alkyl-acetates-chemical-economics-handbook.html>
- [8] SERNA S, CARVAJAL J C, ARISTIZÁBAL V, CARDONA C A. Evaluación tecno-económica y ambiental de la producción de acetato de etilo por vía química y biológica. *Revista de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Nacional de Colombia*. 2015, número 13 octubre-diciembre, pp.22-31, ISSN 1390-1869
- [9] INDEPENDENT CHEMICAL INFORMATION SERVICE, ICIS. *Ethyl acetate prices, markets & analysis*. [sitio web] Publicado en septiembre 2017 [consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <https://www.icis.com/chemicals/ethyl-acetate/?tab=tbc-tab2>
- [10] S&P GLOBAL PLATTS. *Three US producers raise ethyl acetate prices by 8 cents/lb for May*. [sitio web] USA, publicado en mayo 2017 [consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <https://bit.ly/2k5fpiX>

- [11] FURNISS B, HANNAFORD A, SMITH P, TATCHELL A. *Vogel's Textbook of Practical Organic Chemistry*. 5ª edición. Londres: Longman Science & Technical, pp. 695-697 & 699-704. ISBN 9780582462366
- [12] YAN T Y, CHANG J R. *Production of aliphatic esters*. United States Patent no. US 6 399 812 B1, 4 Jun 2002.
- [13] COLLEY, Stephen William. *Synthesis of ethyl ethanoate from ethanol by heterogeneous catalytic dehydrogenation, hydrogenation and purification*. 2002. Durham theses, Durham University. Disponible online en: <http://etheses.dur.ac.uk/4159/>.
- [14] JIRA, Reinhard. Acetaldehyde from Ethylene – A Retrospective on the Discovery of the Wacker Process. *Angewandte Chemie*. 2009, Volumen 48, pp. 9034-9037. DOI 10.1002/anie.200903992.
- [15] PENROD J, AGUILÓ A. Acetaldehyde. En: MCKETTA. *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. 1ª edición. New York (USA): Ed. Marcel Dekker Inc, 1976, volumen 1, pp. 114-161. ISBN: 0-8247-2451-8.
- [16] CAROTENUTO, Giuseppina. *Innovative processes for the production of acetaldehyde, ethyl acetate and pure hydrogen by Ethanol*. 2011. Tesi di Dottorato in Scienze Chimiche, Universidad Federico II Napoli.
- [17] FULLERTON W, MILLER A J. *Process for the production of ethyl acetate*. United States Patent Application Publication no. 2007/0255072 A1, 1 Nov 2007.
- [18] INUI K, KURABAYASHI T, SATO S, ICHIKAWA N. Effective formation of ethyl acetate from ethanol over Cu-Zn-Zr-Al-O catalyst. *Journal of Molecular Catalysis, A: Chemical*. 2004, volumen 216, pp. 147-156. DOI 10.1016/j.molcata.2004.02.017.
- [19] COLLEY S.W, FAWCETT C.R. et al., *Purification of ethyl acetate from mixtures comprising ethanol and water by pressure swing distillation*. [En línea] Patente EP1117629B1, Johnson Matthey Davy Technologies Ltd, 1998. Disponible online en: <https://patents.google.com/patent/EP1117629B1/en>
- [20] SANTACESARIA E, CAROTENUTO G, TESSER R, DI SERIO M. Ethanol dehydrogenation to ethyl acetate by using copper and copper chromite catalysts. *Chemical Engineering Journal*. 2012, volumen 179, pp. 209-220. DOI 10.1016/j.cej.2011.10.043.
- [21] CAROTENUTO G, TESSER R, DI SERIO M, SANTACESARIA E. Bioethanol as feedstock for chemicals such as acetaldehyde, ethyl acetate and pure hydrogen. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2013, Volumen 3, pp. 55-67. DOI 10.1007/s13399-012-0045-3.

- [22] FLACH B, LIEBERZ S, ROSSETTI A. *EU biofuels annual 2017 report*. The Hague. Global Agricultural Information Network, USDA Foreign Agricultural Service. GAIN Report Number: NL7015
- [23] AGRICULTURE AND HORTICULTURE DEVELOPMENT BOARD. *Cereals & oilseeds: ethanol prices slump pinches*. [sitio web] United Kingdom [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://cereals.ahdb.org.uk/markets/market-news/2017/november/14/grain-market-daily-141117.aspx>
- [24] BARRAL, Manuel. El fondo Trilantic Europe cierra la compra de la coruñesa Bioetanol Galicia a Abengoa. *La Opinión*. [en línea] 18 de marzo de 2017 [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <http://www.laopinioncoruna.es/economia/2017/03/18/fondo-trilantic-europe-cierra-compra/1162858.html>
- [25] BARRAL, M. El fondo Trilantic Europe compra Bioetanol Galicia a Abengoa. *Faro de Vigo*. [en línea] 18 de marzo de 2017 [consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <http://www.farodevigo.es/economia/2017/03/18/fondo-trilantic-europe-compra-bioetanol/1643301.html>
- [26] GLOBAL MARKET INSIGHTS. *Acetic Acid market size by application (VAM, PTA, acetate esters, acetic anhydride), bio-based acetic Acetic Acid (industry scope, technology insights, commercialization, addressable market potential), industry analysis report, regional outlook (US, Canada, Germany, UK, France, Spain, Italy, China, India, Japan, Australia, Indonesia, Malaysia, Brazil, Mexico, SA, GCC), growth potential, price trends, competitive market share & forecast 2017-2024*. [sitio web] Delaware, USA [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/acetic-acid-market>
- [27] IHS MARKIT. *Acetic Acid: Chemical Economics Handbook*. [sitio web] Londres, publicado en diciembre 2016 [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://ihsmarkit.com/products/acetic-acid-chemical-economics-handbook.html>
- [28] INDEPENDENT CHEMICAL INFORMATION SERVICE, ICIS. *Acetic Acid prices, markets & analysis*. [sitio web] Publicado en septiembre 2017 [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://www.icis.com/chemicals/acetic-acid/?tab=tbc-tab2>
- [29] BERG L, RATANAPUPECH P. *Process for the separation of Ethyl Acetate from ethanol and water by extractive distillation*. United States Patent no. 4,569,726. Feb. 11, 1986.
- [30] ANDREATTA A.E, CHARNLEY M.P, BRENNECKE J.F. Using Ionic Liquids to break Ethanol-Ethyl Acetate azeotrope. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2015, volumen 3, pp. 3435-3444. DOI 10.1021/acssuschemeng.5b01175.

- [31] JOHNSON MATTHEY PROCESS TECHNOLOGIES. *Ethyl acetate DAVY's process*. London, 2017.
- [32] CAROTENUTO G, TESSER R, DI SERIO M, SANTACESARIA E. Kinetic study of ethanol dehydrogenation to ethyl acetate promoted by a copper/copper chromite based catalyst. *Catalysis Today*. 2013, volumen 203, pp. 202-210. DOI 10.1016/j.cattod.2012.02.054.
- [33] GALIPEDIA, A WIKIPEDIA EN GALEGO. *Polígono industrial de Curtis-Teixeiro*. [sitio web, consultado en febrero 2018]. Disponible online en: https://gl.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADgono_industrial_Curtis-Teixeiro
- [34] ABENGOA BIOENERGIA. *Oficinas e instalaciones Bioetanol Galicia*. [sitio web, consultado en febrero 2018] Disponible online en: http://www.abengoabioenergy.com/web/es/acerca_de/oficinas_e_instalaciones/bioetanol/europa/bioetanol_gali/index.html
- [35] CURTIS INDUSTRIAL. *Página web oficial del Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro*. [sitio web, consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <http://www.curtis-industrial.com/>
- [36] CLIMATE DATA.ORG. *Clima: Teixeira*. [sitio web, consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://es.climate-data.org/location/468759/>
- [37] LOGSDON J.E. Ethanol. En: KIRK-OTHMER *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4ª edición. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1994, Volumen 9. ISBN: 0-471-52677-0
- [38] KOSARIC N, DUVNJAK Z, SAHM H, GOEBEL O, MAYER D. Ethanol. En: ULLMANN. *Encyclopedia of industrial chemistry*. 5ª edición. Weinheim (RFA): VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987, volumen A 9, pp. 587-653. ISBN 3-527-20109-2.
- [39] SITTON O, FOUTCH G, BOOK N, GADDY J. Ethanol Production from Agricultural Residues. En: MCKETTA. *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. 1ª edición. New York (USA): Ed. Marcel Dekker INC, 1984, volumen 20, pp. 40-51. ISBN 0-8247-270-4
- [40] REINHARD J, REINHOLD J. Acetaldehyde. En: ULLMANN. *Encyclopedia of industrial chemistry*. 5ª edición. Weinheim (RFA): VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987, volumen A 1, pp. 31-44. ISBN 3-527-20101-7
- [41] HAGEMEYER H. Acetaldehyde. En: KIRK-OTHMER. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4ª edición. . New York: Ed. John Wiley & Sons, 1994, Volumen 1. ISBN 0-471-52669-X
- [42] HÄUSSINGER P, LOHMÜLLER R, WATSON A. Hydrogen. En: ULLMANN. *Encyclopedia of industrial chemistry*. 5ª edición. Weinheim (RFA): VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987, volumen A 13, pp.297-442. ISBN 3-527-20113-0

- [43] CAMEO CHEMICALS. *Aldol. Database of Hazardous Materials*. [sitio web] U.S. Department of Commerce. [Consultado en abril 2018] Disponible online en: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/2331>
- [44] DOW CHEMICAL PRODUCT TECHNICAL DATA. *Dowtherm Q: Heat Transfer Fluid*. USA, 1997. Europe Form number: CH 153-041-E-697
- [45] SEIDER W, SEADER J, LEWIN D, WIDAGDO S. Process Creation for Basic Chemicals, en: *Product and Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation*. 3ª edición. USA: Ed. John Wiley & Sons, 2009, Chapter 4, ISBN 0-4700-4895-6
- [46] INUI K, KURABAYASHI T, SATO S. Direct Synthesis of Ethyl Acetate from Ethanol carried out under pressure. *Journal of Catalysis*. 2002, volumen 212, pp. 207-215. DOI doi:10.1006/jcat.2002.3769
- [47] STEPHANOPOULOS G. Part I: The Control of a Chemical Process: its characteristics and associated problems, en: *Chemical Process Control. An introduction to theory and practice*. 1ª edición. New Jersey, USA: Ed. Prentice-Hall, 1984, ISBN: 0-13-128629-3
- [48] SVRCEK W, MAHONEY D, YOUNG B. *A Real-Time Approach to Process Control*. 3ª edición. West Sussex, UK: Ed. John Wiley & Sons, 2014, ISBN: 978-1-119-99387-2.
- [49] ILCHENKO M. *Reciprocating Compressor vs Centrifugal Compressor*. LinkedIn Article. [Sitio web] Publicado en abril 2016 [Consultado en abril 2018] Disponible online en: <https://www.linkedin.com/pulse/reciprocating-compressor-vs-centrifugal-mikhail-ilchenko/>
- [50] España. Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. Boletín Oficial del Estado, 20 de octubre de 2015, Sección I, núm. 251, pp 97531-97567.
- [51] INSHT, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *Fichas internacionales de seguridad química*. [sitio web, consultado en abril 2018] Disponible online en: <https://bit.ly/1p9OaST>
- [52] ECHA: European Chemicals Agency. *Base de datos del catálogo de clasificación y etiquetado según Reglamento CLP*. [sitio web, consultado en abril 2018] Disponible online en: <https://echa.europa.eu/es/information-on-chemicals/cl-inventory-database>
- [53] MELHEM G, SHANLEY E. *On the estimation of hazard potential for chemical substances* [sitio web] Arthur D. Little, Inc. Cambridge, USA [consultado en abril 2018] Disponible online en: <https://bit.ly/2l0nCQJ>
- [54] CROWL D, LOUVAR J. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. Chapter 8: Introduction to Reliefs & Chapter 9: Relief Sizing. 2ª edición. New Jersey (USA): Ed. Prentice-Hall, 2002, pp. 353-428. ISBN: 0-13-018176-5.

[55] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. *Índice de incendio y explosión: Guía para la clasificación de riesgos*. Madrid, 1980. ISBN 84-500-9062-8.

ANEXO I. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Contenido

1.	Base teórica	2
1.1	Balances de materia	2
1.2	Balances de energía	3
2.	Intercambiador de calor E-101	4
3.	Intercambiador de calor E-102	5
4.	Intercambiador de calor E-103	6
5.	Reactor catalítico R-201	6
6.	Compresor K-301	9
7.	Intercambiador de calor E-301 y tambor flash V-301	10
8.	Columna de destilación azeotrópica T-401	13
9.	Depósito flash V-401 e intercambiador de calor E-401	15
10.	Columna de destilación T-402	17
11.	Columna de destilación T-403	18
12.	Balance de materia global	20

1. Base teórica

En esta sección introductoria del Anexo I del presente documento se introducirán los fundamentos teóricos en los cuales se basan el cálculo del balance de materia y de energía de la planta de producción de acetato de etilo. En resumidas cuentas, el balance de materia es la base del diseño del proceso y el balance de energía permite estipular los requerimientos energéticos de la planta de producción para llevar a cabo la operación de manera satisfactoria.

1.1 Balances de materia

Se dice que son la base de diseño del proceso puesto que el balance de materia global permite estipular la cantidad de reactivos a introducir en la planta de producción así como los productos obtenidos. Del mismo modo, los balances de materia sobre las distintas unidades de proceso configuran los flujos de corriente y sus composiciones y proporcionan los fundamentos necesarios para el dimensionado de los equipos. La ecuación general de balance, definida sobre el Principio de Conservación de la Masa, que se utiliza a lo largo del Anexo I es la siguiente:

$$S - E + A = G \quad (1)$$

donde S es la salida del sistema, E la entrada, A la acumulación (asume un valor nulo en condiciones de estado estacionario) y G la generación, que únicamente toma valores diferentes de cero en etapas donde ocurra reacción química. Por lo tanto, para todas las unidades a excepción del reactor R-201 el balance de materia se simplifica a:

$$S - E = 0 \quad (2)$$

o lo que es lo mismo, que la materia que entra es igual a la que sale, en términos másicos (kg/h). Este balance de materia también se puede aplicar para cada uno de los componentes presentes en la mezcla, teniendo en cuenta el concepto de composición o fracción molar. Para N componentes se dispone de N ecuaciones linealmente independientes, de tal manera que uno de ellos se puede expresar como combinación lineal de los otros teniendo en cuenta el balance global. No obstante, para comprobar que el Principio de Conservación se cumple, se utiliza este balance global como parámetro de comprobación constatando que la suma de los términos involucrados es 0, cerrando así el balance siguiendo el método algebraico.

Esta metodología de cálculo del cierre se aplica a todas aquellas unidades en las que se produzca un cambio en la composición de las corrientes: reactor R-201, tambor flash V-301, columna de destilación azeótropa T-401, tambor flash V-401, torre de purificación de reciclo T-402 y torre de purificación de producto T-403; en el resto de unidades (bombas centrífugas, intercambiadores de calor, compresores, válvulas de estrangulamiento...) la corriente de entrada se corresponde con la de salida.

Finalmente, puesto que la conversión del reactivo por paso en el reactor no es del 100% es necesario introducir una corriente de recirculación. Ya que se trata de una casuística simple en la que únicamente se dispone de un lazo de recirculación, los cálculos

realizados se basan en un método algebraico formal: las ecuaciones del balance de materia se establecen con el flujo de recirculación como incógnita, siendo cuidadosos con la base de cálculo y los límites del sistema considerados.

1.2 Balances de energía

Los estudios de Einstein demostraron que la materia y la energía son equivalentes: la energía se puede convertir en materia y viceversa; sin embargo, la pérdida de masa asociada a la producción de energía únicamente es significativa en reacciones nucleares. Es por ello que la conservación de la materia y de la energía se llevan a cabo de manera independiente en las reacciones químicas.

El balance de energía se realiza para todas las unidades del proceso, empleando la ecuación (1) de este anexo en términos de energía, que no es más que una forma de expresar la 1ª Ley de la Termodinámica. La magnitud empleada para llevar a cabo los balances de energía es la entalpía, que es una función de estado que únicamente depende de los estados inicial y final.

El cálculo de la entalpía se lleva a cabo mediante los calores específicos, para los cuales existen diferentes correlaciones en función de la fase de la corriente en cuestión: para fase gas se sigue el procedimiento explicitado en el Anexo II. Cálculos Justificativos, mientras que para líquidos orgánicos se emplea el método de contribución de grupos propuesto por Chueh y Swanson (1973)¹, que proporciona estimaciones bastante precisas.

Para los intercambiadores de calor se tienen en cuenta tanto la corriente de operación como la de fluido de servicio, considerando que la transmisión de calor se produce únicamente por conducción (del fluido caliente al fluido frío a través del espesor del equipamiento que los separa) en el seno del intercambiador adiabático, por lo que no se consideran pérdidas de calor al exterior por los mecanismos de convección y/o radiación. Teniendo en cuenta las características termodinámicas del fluido de servicio se calculan los requerimientos másicos para llevar a cabo la operación de manera satisfactoria.

Nuevamente, en las unidades en las que se produzca reacción química se debe tener en cuenta el cambio de energía debido a la reacción, considerando el término de generación. En el reactor R-201 se propuso un balance de energía tanto a la mezcla reaccionante como al fluido calefactor, ambos en forma diferencial y resueltos simultáneamente con los balances de materia de cada componente, con el fin de ser rigurosos en la metodología de cálculo. Por este motivo, el balance de energía al reactor

¹ SINNOTT R, TOWLER G. *Chemical Engineering Design. Principles, practice and economics of plant and process design*. Chapter 8: design information and data, 8.9.1: specific heat capacity for solids and liquids (pp. 442-445). 1ª edición. San Diego, CA, USA: Ed. Elsevier, 2008, ISBN 13: 978-0-506-8423-1.

se expresa en forma de perfil de temperaturas de la mezcla reaccionante con respecto a la masa de catalizador, pudiendo conocer el estado térmico en cualquier punto del reactor multitubular.

Finalmente, en las columnas de destilación se asume como T_{REF} la temperatura de la alimentación, de tal modo que la entalpía de la corriente de entrada a las diferentes columnas es nula. Partiendo de la base de que se trabaje en una configuración típica con un condensador total, el balance de energía se cierra mediante el cálculo del requerimiento (*duty*) energético que ha de aportar el calderín de fondos, con el propósito de no violar el Principio de Conservación de la Energía.

2. Intercambiador de calor E-101

Siguiendo un enfoque heurístico, debido a los múltiples regímenes de flujo bifásicos que ocurren cuando un fluido ebulle, es mejor disponer de tres intercambiadores de calor separados para cambiar el estado termodinámico de líquido subenfriado a vapor sobrecalentado, especialmente cuando la diferencia entre el punto de burbuja y el punto de rocío son pequeñas.

El intercambiador de carcasa y tubos E-101 se destinará a precalentar la corriente líquida de alimentación al reactor (que consta de la alimentación fresca a la planta de proceso sumada a la corriente de recirculación) hasta la condición de líquido saturado, empleando como fluido de servicio -que circulará por tubos- vapor de media presión, mps, a una temperatura de 200°C.

En lo relativo al balance de materia, la corriente de entrada será igual a la de salida, puesto que no se realiza la transmisión de calor de manera directa, sino que el fluido de operación circula por la carcasa y el fluido de servicio por los tubos. Los resultados del mismo se presentan en la tabla 1:

Tabla 1: Balance de materia al intercambiador de calor E-101

Flujo másico (kg/h)	Corriente 3	Corriente 4
Etanol	10385.66	10385.66
Acetaldehído	141.85	141.85
Acetato de etilo	0.00	0.00
Hidrógeno	0.00	0.00
Acetaldol	0.00	0.00
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00
TOTAL	10527.51	10527.51

En lo tocante al balance de energía, se plantea la ecuación de diseño de un intercambiador de calor para el caso en el que se emplee un vapor condensante como

utilidad, donde el subíndice i hace referencia a los compuestos químicos de la corriente de proceso y u a utilidad:

$$Q = \sum_i m_i \cdot C_{p,i} \cdot (T_{sal,i} - T_{ent,i}) = m_u \cdot \lambda_{vap,u} \quad (3)$$

El cierre del balance -lógico, puesto que se realiza a partir de las corrientes involucradas- se recoge en la siguiente tabla. La utilidad utilizada en el E-101 es vapor de media presión, mps (15.5 bar aproximadamente):

Tabla 2: Balance de energía al intercambiador de calor E-101

Parámetros balance	Valor
$m_3=m_4$ (kg/s)	2.92
C_p (kJ/kg K)	4.01
T_3 (K)	298.15
$T_{burbuja}=T_4$ (K)	452.85
Q_{E-101} (kW)	1815.22
$\lambda_{vap,mps}$ (kJ/kg)	1938.6
$m_{mps\ E-101}$ (kg/h)	3370.88

3. Intercambiador de calor E-102

En el proceso de acondicionamiento de la corriente de alimentación al reactor hasta sus condiciones óptimas, el intercambiador de calor E-102 se encarga de la evaporación. Por tanto, en un evaporador del tipo *kettle*, se utiliza vapor de media presión (mps) para transferir el calor latente que permite cambiar el estado de la corriente de líquido saturado a vapor saturado.

Nuevamente, el balance de materia es idéntico al presentado en la Tabla 1 de este Anexo relativo al intercambiador E-301; por la contra, la ecuación de diseño del intercambiador de calor que recoge el balance de energía cambia puesto que el fluido de operación ha de ser considerado como una mezcla susceptible de ebullición, de tal manera que la ecuación a utilizar es la siguiente:

$$Q = \sum_i m_i \cdot \lambda_{vap,i} = m_u \cdot \lambda_{vap,u} \quad (4)$$

El cierre del balance de energía en el evaporador E-102 se resume en la tabla 3:

Tabla 3: Balance de energía al evaporador E-102

Parámetros balance	Valor
$m_4=m_5$ (kg/s)	2.92
$\lambda_{vap,i}$ (kJ/kg)	604.80
Q_{E-302} (kW)	1768.62
$\lambda_{vap,mps}$ (kJ/kg)	1938.6
m_{mps} E-102 (kg/h)	3284.35

4. Intercambiador de calor E-103

El último intercambiador del tren de acondicionamiento tiene la finalidad de transferir el calor sensible a la corriente gaseosa de tal manera que pase de su punto de rocío a la temperatura óptima de reacción, 220°C, que caracteriza un estado termodinámico de vapor sobrecalentado. En este caso se empleará como utilidad vapor de alta presión (hps, 40 bar aproximadamente) a una temperatura de 250°C.

Como es lógico, el balance de materia a esta unidad es el mismo presentado en la tabla 1 del Anexo; el balance de energía se basa en la ecuación de diseño de un intercambiador de calor (3). Los resultados se resumen en la tabla 4:

Tabla 4: Balance de energía al intercambiador de calor E-103

Parámetros balance	Valor
$m_5=m_6$ (kg/s)	2.92
C_{p5} (kJ/kg K)	2.04
C_{p6} (kJ/kg K)	2.15
$\overline{C_p}$ (kJ/kg K)	2.09
$T_{rocío} = T_5$ (K)	452.85
T_6 (K)	493.15
Q_{E-103} (kW)	246.76
$\lambda_{vap,hps}$ (kJ/kg)	1714.7
m_{hps} E-103 (kg/h)	518.08

5. Reactor catalítico R-201

El aparato matemático utilizado para determinar la composición de la corriente de salida del reactor se especifica de manera minuciosa en el Anexo II. Cálculos Justificativos del presente trabajo. Consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que tiene en cuenta las tres reacciones que tienen lugar en el reactor para calcular los flujos de cada uno de los componentes a través de los balances de materia que sintetizan las ecuaciones de diseño del reactor.

Además, como se trata de un sistema no-isotérmico también incluye los balances de energía a la mezcla reaccionante y al fluido calefactor para actualizar los valores de las velocidades de reacción en cada punto del reactor, en función de la masa de catalizador (el valor de la temperatura influye directamente en las constantes cinéticas y en las constantes de equilibrio de reacción).

Hay que tener en cuenta que las variables dependientes del sistema de ecuaciones diferenciales no lineales son los flujos molares: bajo el régimen de reacción química, los compuestos reaccionan mol a mol según las estequiometrías que rigen el sistema. Sin embargo, la conservación de la materia se aplica en términos másicos. Las corrientes de entrada y salida del reactor se recogen en la tabla 5:

Tabla 5: Balance de materia al reactor R-201

Flujo másico (kg/h)	Corriente 6	Corriente 7
Etanol	10385.66	3652.20
Acetaldehído	141.85	208.76
Acetato de etilo	0.00	6318.82
Hidrógeno	0.00	294.65
Acetaldol	0.00	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00
TOTAL	10527.51	10527.51

El modelo cinético utilizado para describir la deshidrogenación de etanol a acetato de etilo empleando el catalizador sobre el cual se basa este trabajo explicita minuciosamente las dos reacciones principales del proceso: deshidrogenación del etanol a acetaldehído y reacción del etanol no convertido con el acetaldehído para dar acetato de etilo. Sin embargo, la reacción secundaria es considerada como una reacción irreversible de pseudo-2º orden en el que la autocondensación de acetaldehído da lugar a otros subproductos. Los flujos molares de salida del reactor, que permiten deducir los flujos másicos de la corriente 7 presentada en la tabla 5, son los siguientes:

Tabla 6: Flujos molares de salida del reactor obtenidos mediante análisis numérico riguroso

Flujos molares corriente 7 (kmol/h)	Valor
Etanol	79.28
Acetaldehído	4.74
Acetato de etilo	71.72
Hidrógeno	146.16
Otros subproductos	0.60

Para que cierre el balance de materia es necesario que la producción másica de otros subproductos sea de 53.09 kg/h. Puesto que se conoce el flujo molar, con una simple división se puede inferir la masa molar de los subproductos:

$$M_m = \frac{m}{n} = \frac{53.09 \text{ kg/h}}{0.60 \text{ kmol/h}} = 88.11 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad (5)$$

Esta masa molecular se corresponde con la de un compuesto que posea 4 átomos de carbono, 8 átomos de hidrógeno y 2 de oxígeno: $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$. Acudiendo a las fuentes bibliográficas se observa que según el esquema reactivo de Inui et al², la reacción del acetaldehído consigo mismo deriva en la obtención de acetaldol, susceptible de una condensación para dar lugar crotonaldehído. El quid de la cuestión reside en la fórmula molecular del acetaldol: $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$; por lo cual para que cierre el balance de materia basta con asumir que los otros subproductos se agrupan como acetaldol.

En lo relativo al balance de energía, se sigue nuevamente el procedimiento introducido de manera pormenorizada en el Anexo II. Cálculos Justificativos para llevar a cabo el diseño riguroso del reactor catalítico R-201. Los resultados, en términos de temperatura, de la resolución simultánea de los dos balances de energía con los cinco balances de materia se recogen a continuación en la tabla 7:

Tabla 7: Balance de energía al reactor R-201

Temperatura (K)	Valor
Entrada al reactor: T_6	493.15
Salida del reactor: T_7	493.88
Entrada fluido térmico	560.15
Salida fluido térmico	493.95

Con los valores presentados en la Tabla 7 se puede comprobar cómo se diseña el reactor para que opere de manera óptima: tal y como se presentó en el apartado 9.2 *Condiciones óptimas de operación: estudio termodinámico* de la Memoria, la temperatura ideal de operación son 220°C , por lo cual se busca un régimen lo más isotérmico posible mediante la utilización del aceite térmico que compensa la endotermicidad inherente a la reacción global. Asimismo, también se puede observar que a la salida del reactor la mezcla reaccionante y el fluido térmico han alcanzado prácticamente el equilibrio térmico.

² INUI K, KURABAYASHI T, SATO S. Direct Synthesis of Ethyl Acetate from Ethanol Carried Out under Pressure. *Journal of Catalysis* 2002, vol. 212, pp. 207-215. DOI: 10.1006/jcat.2002.3769

6. Compresor K-301

El balance de materia en esta unidad se simplifica al caso en el cual la entrada tiene que ser igual a la salida, puesto que la finalidad de esta unidad es aumentar la presión de la corriente de productos de reacción hasta 25 bar para facilitar la separación del hidrógeno gas de la corriente líquida bruta en el depósito flash V-301 previo a la sección 400. Los resultados se presentan en la tabla 8:

Tabla 8: Balance de materia al compresor K-301

Flujo másico (kg/h)	Corriente 7	Corriente 8
Etanol	3652.20	3652.20
Acetaldehído	208.76	208.76
Acetato de etilo	6318.82	6318.82
Hidrógeno	294.65	294.65
Acetaldol	53.09	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00
TOTAL	10527.51	10527.51

Hablando del balance de energía, es necesario poder inferir la temperatura de salida de la corriente gaseosa tras el proceso de compresión, puesto que un incremento de presión implica también un aumento de temperatura, dada la condición de fluido compresible. Un proceso adiabático es aquel donde no existe transferencia de calor entre el sistema y sus alrededores. Por ello, la aplicación de la 1ª Ley de la Termodinámica a 1 mol de gas ideal en un proceso donde no hay flujo y que es mecánicamente reversible da como resultado:

$$dU = dW = -P dV \quad (6)$$

Dado que el cambio en la energía interna se especifica en términos del calor específico teniendo en cuenta la variación de temperatura, y aplicando la Ley de los Gases Ideales, tras reacomodar los términos se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_v} \frac{dV}{V} \quad (7)$$

Denotando el cociente de capacidades caloríficas a presión constante y a volumen constante como γ , y bajo la relación entre ambas con la constante de los gases ideales ($C_p = C_v + R$) se obtiene una ecuación diferencial, que tras la operación de integración resulta en:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad (8)$$

Aplicando la Ley de Boyle-Mariotte que establece la relación inversamente proporcional entre presión y volumen se obtiene la expresión que permite calcular la temperatura de salida del gas susceptible al proceso de compresión en K-301:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (9)$$

siendo habitual considerar el coeficiente $\gamma=7/5$ bajo la suposición de gas ideal (en este caso se trabaja a presión elevada en comparación con la atmosférica, pero se realiza la simplificación igualmente, dado que el resultado no varía en exceso al comprobar los cálculos empleando un simulador de procesos). El dato calculado, así como los parámetros necesarios para su cálculo, se introducen en la tabla 9:

Tabla 9: Cálculos para determinar temperatura de salida de corriente gaseosa del K-301

Parámetros balance	Valor
γ (gas ideal)	1.40
P_7 (bar)	19.81
P_8 (bar)	25
T_7 (°C)	220
T_8 (°C)	235.12

7. Intercambiador de calor E-301 y tambor flash V-301

El intercambiador de calor E-301 tiene como propósito la transmisión de calor sensible y latente de tal manera que la corriente de salida del compresor se condense parcialmente: al enfriar esta corriente a una temperatura de 35°C los productos orgánicos condensan para dar una corriente líquida bruta mientras que el hidrógeno permanece en fase gas, debido a su muy diferente punto de ebullición y asumiendo nula solubilidad del hidrógeno en el líquido orgánico. Al enfriar y condensar (total o parcialmente) una corriente gaseosa, desde un punto de vista heurístico se recomienda utilizar un único intercambiador de calor. El balance de materia al E-301 es trivial al ser nulos los términos de generación y acumulación, como se puede observar en la tabla 10:

Tabla 10: Balance de materia al E-301

Flujo másico (kg/h)	Corriente 8	Corriente 9
Etanol	3652.20	3652.20
Acetaldehído	208.76	208.76
Acetato de etilo	6318.82	6318.82
Hidrógeno	294.65	294.65
Acetaldol	53.09	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00
TOTAL	10527.51	10527.51

El tambor flash V-301, previo a la sección 400, no es más que un recipiente a presión (25 bar aproximadamente) donde se posibilita la separación de la corriente líquida bruta, que ha condensado en el E-301, y el hidrógeno gas que escapa por la zona superior del

depósito flash. El balance de materia correspondiente a esta situación se presenta en la tabla 11, donde se puede comprobar su cierre:

Tabla 11: Balance de materia al depósito flash V-301

Flujo másico (kg/h)	Corriente 9	Corriente 10	Corriente 11
Etanol	3652.20	0.00	3652.20
Acetaldehído	208.76	0.00	208.76
Acetato de etilo	6318.82	0.00	6318.82
Hidrógeno	294.65	294.65	0.00
Acetaldol	53.09	0.00	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00	0.00
TOTAL	10527.51	294.65	10232.86

La transmisión de calor se lleva a cabo en el intercambiador E-301 donde el fluido de operación circulará por la carcasa y el fluido de servicio, agua de enfriamiento a 25°C cuya temperatura máxima de retorno son 45°C, circulará por tubos.

Así, se considera la transmisión de calor sensible que posibilita el enfriamiento de los productos de reacción hasta su punto de rocío, la transmisión de calor latente para condensar los líquidos orgánicos (considerando la entalpía de vaporización de la mezcla de compuestos condensables) y el enfriamiento de la corriente líquida bruta y de los no condensables hasta la temperatura estipulada. De esta manera, el balance de energía al E-301 se divide en cuatro etapas diferentes, aplicando las ecuaciones (3) y (4) para su resolución numérica. La primera etapa se recoge en la tabla 12:

Tabla 12: 1ª etapa E-301, de enfriamiento a punto de rocío de la mezcla original

Parámetros balance	Valor
$m_8=m_9$ (kg/h)	10527.51
$C_{p,8}$ (kJ/kg K)	2.30
$C_{p,pto\ rocío}$ (kJ/kg K)	2.08
$\overline{C_p}$ (kJ/kg K)	2.19
T_8 (K)	508.27
$T_{Punto\ rocío}$ (K)	438.85
$Q_{1\ E-301}$ (kW)	447.91

La segunda etapa considera la transmisión de calor latente necesaria para condensar los compuestos orgánicos, por lo que el hidrógeno gas no influye en la ecuación que modeliza el balance de energía:

Tabla 13: 2ª etapa E-301, de condensación de los compuestos orgánicos

Parámetros balance	Valor
$m_{\text{orgánicos}}$ (kg/h)	10232.86
$\lambda_{\text{vap, orgánicos}}$ (kJ/kg)	549
Q_2 E-301 (kW)	1560.51

La tercera etapa considera el enfriamiento sensible de la corriente líquida orgánica desde el punto de rocío hasta la temperatura de diseño del tambor V-301:

Tabla 14: 3ª etapa E-301, de enfriamiento del líquido orgánico

Parámetros balance	Valor
$m_{\text{orgánicos}}$ (kg/h)	10232.86
$C_{p, \text{orgánicos}}$ (kJ/kg K)	2.85
$T_{\text{Punto Rocío}}$ (K)	438.35
T_9 (K)	308.15
Q_3 E-301 (kW)	1056.23

Finalmente se considera el enfriamiento de la corriente gaseosa de H_2 puesto que es un compuesto no condensable en las condiciones de operación del depósito flash:

Tabla 15: 4ª etapa E-301, de enfriamiento del hidrógeno gas

Parámetros balance	Valor
m_{H_2} (kg/h)	294.65
$C_{p, \text{Punto Rocío}}$ (kJ/kg K)	14.52
$C_{p, 9}$ (kJ/kg K)	14.31
$\overline{C_p}$ (kJ/kg K)	14.41
$T_{\text{Punto Rocío}}$ (K)	438.35
T_9 (K)	308.15
Q_4 E-301 (kW)	153.60

Mediante una suma de los requerimientos energéticos en cada una de las etapas y conociendo las condiciones de operación del fluido de servicio resulta fácil cerrar el balance de energía calculando la cantidad de utilidad necesaria para llevar a cabo la operación completa en el intercambiador de calor E-301, que posibilita posteriormente el aislamiento del hidrógeno gas en el tambor V-301:

Tabla 16: Cierre del balance de energía al intercambiador E-301 + depósito flash V-301

Cierre balance E-301	Valor
Q_{E-301} (kW)	3218.26
$C_{p, cw}$ (kJ/kg K)	4.18
$T_{\text{ent, cw}}$ (K)	298.15
$T_{\text{sal, cw}}$ (K)	318.15
m_{cw} (kg/h)	138597.97

8. Columna de destilación azeotrópica T-401

Una vez aislado el hidrógeno gas, la corriente líquida se dirige a la sección de separación. Puesto que el etanol y el acetato de etilo son los productos deseados en esta sección y ambos forman un azeótropo, es necesario llevar a cabo una destilación azeotrópica extractiva; en este caso se ha optado por usar un líquido iónico (metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio) como *entrainer* por sus propiedades privilegiadas, que permiten una separación perfecta de ambos compuestos.

Puesto que tanto el LNK (acetaldehído) como el HNK (acetaldol) se encuentran en cantidades muy pequeñas en relación con los compuestos considerados como clave (LK: acetato de etilo, HK: etanol) se puede asumir que son arrastrados por cabezas y colas de la columna respectivamente; el balance de materia a esta primera columna de destilación, teniendo en cuenta que la razón de líquido iónico con respecto a la alimentación es 0.025:1 en fase molar, se introduce a continuación:

Tabla 17: Balance de materia a la columna azeotrópica T-401

Flujo másico (kg/h)	Corriente 12	Corriente 13	Corriente 14	Corriente 15
Etanol	3652.20	0.00	0.00	3652.20
Acetaldehído	208.76	0.00	208.76	0.00
Acetato de etilo	6318.82	0.00	6318.82	0.00
Hidrógeno	0.00	0.00	0.00	0.00
Acetaldol	53.09	0.00	0.00	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	826.84	0.00	826.84
TOTAL	10232.86	826.84	6527.58	4532.13

El cierre del balance se cumple puesto que la suma de las entradas es igual a la suma de las salidas en kg/h.

Dado que no se ha realizado el diseño riguroso de la columna de destilación azeotrópica (no es objeto del presente Trabajo Fin de Grado) no se dispone de información acerca de los balances internos relativos a la columna de destilación, por lo que el balance de energía se va a cerrar como una estimación de la cantidad energética a proporcionar en el calderín de fondos, teniendo en cuenta las entradas (alimentación y *entrainer*, en este caso) y las salidas (corriente de destilado y corriente de colas). Reordenando la ecuación (1) en términos de energía para una columna de destilación, la expresión obtenida es la siguiente:

$$F \cdot h_F + IL \cdot h_{IL} + Q_C + Q_R = D \cdot h_D + B \cdot h_B \quad (10)$$

donde aparecen dos incógnitas, los requerimientos energéticos (*duties*) del condensador y del *reboiler*. Sin embargo, si se utiliza un condensador total, se puede aplicar el balance de energía correspondiente a este equipamiento:

$$Q_C = V \cdot (-\lambda_{vap}) \quad (11)$$

donde V es el vapor que se evapora por cabezas de la columna. Aplicando un balance de materia en esta zona, $V=L+D$, donde la cantidad de líquido que se devuelve a la columna se define en términos de la razón de reflujo $R=L/D$ (*reflux ratio*); este parámetro se puede estimar de manera bastante rápida mediante procedimientos analíticos empleando las dos ecuaciones de Underwood³. Por lo tanto, el balance de energía al condensador según los parámetros definidos por los balances externos a la columna viene definido por:

$$Q_C = (R + 1) \cdot D \cdot (-\lambda_{vap}) \quad (12)$$

y la única incógnita en (10) es el requerimiento energético en el calderín de fondos, que se calcula para cerrar el balance de energía de tal manera que se cumple la 1ª Ley de la Termodinámica. Los resultados para la columna T-401, asumiendo como temperatura de referencia la temperatura de la corriente de alimentación, son:

Tabla 18: Balance de energía a la columna de destilación azeotrópica T-401

Parámetros balance	Valor
$C_{p,12}$ (kJ/kg K)	2.47
$C_{p,13}$ (kJ/kg K)	1.67
$C_{p,14}$ (kJ/kg K)	1.98
$C_{p,15}$ (kJ/kg K)	3.21
T_{14} (K)	341.36
T_{15} (K)	351.18
Razón de reflujo supuesta	0.80
$-\lambda_{vap,14}$ (kJ/kg)	-386.90
Q_C T-401 (kW)	-1262.76
Q_R T-401 (kW)	1556.08

Considerando que el fluido de servicio en el condensador es agua de enfriamiento sujeta a las mismas condiciones que las anteriormente introducidas y que en el calderín de fondos es vapor de baja presión (lps, 2 bar) a unos 120°C, las utilidades necesarias para la operación de la columna de destilación son:

Tabla 19: Utilidades necesarias para satisfacer los requerimientos energéticos en la T-401

Parámetros balance	Valor
$C_{p,cw}$ (kJ/kg K)	4.18
$T_{ent,cw}$ (K)	298.15
$T_{sal,cw}$ (K)	318.15
m_{cw} T-401 (kg/h)	54377.24
$\lambda_{vap,lps}$ (kJ/kg)	2202.20
m_{lps} T-401 (kg/h)	2543.76

³ WANKAT P. *Ingeniería de procesos de separación*. Capítulo 7: métodos abreviados aproximados para destilación de varios componentes: reflujo mínimo mediante ecuaciones de Underwood. 2ª edición. México: Editorial Pearson Educacion, 2008, ISBN: 978-970-26-1281-0.

9. Depósito flash V-401 e intercambiador de calor E-401

La corriente de fondos de la columna T-401 contiene al líquido iónico junto a los compuestos menos volátiles de la mezcla orgánica: etanol y acetaldehído. En la válvula de estrangulamiento VLV-401 esta corriente se ve sometida a un proceso de depresión, entrando a vacío (0.5 bar) en un proceso isoentálpico que deriva en la vaporización de los compuestos orgánicos. Con el fin de aislar el líquido iónico no volátil de los compuestos gaseosos se introduce la mezcla en el depósito flash V-401 que trabaja a vacío con la ayuda de un eyector, donde los gases salen por la zona superior. El balance de materia, aprovechando la volatilidad nula del metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio, al tambor flash V-401 se resume en la tabla 20:

Tabla 20: Balance de materia al tanque flash V-401, donde se recupera el líquido iónico

Flujo másico (kg/h)	Corriente 16	Corriente 17	Corriente 18
Etanol	3652.20	3652.20	0.00
Acetaldehído	0.00	0.00	0.00
Acetato de etilo	0.00	0.00	0.00
Hidrógeno	0.00	0.00	0.00
Acetaldehído	53.09	53.09	0.00
[emim][MeSO ₃]	826.84	0.00	826.84
TOTAL	4532.13	3705.29	826.84

La suma de las salidas del flash (corriente 17 de cabezas y corriente 18 de colas) iguala lógicamente en términos másicos (kg/h) la entrada al mismo, con lo que cierra el balance. Es importante destacar que a pesar de la no volatilidad teórica del líquido iónico se contempla la posibilidad de regenerar el mismo de manera periódica debido a perturbaciones; no obstante, al trabajar lejos del punto de descomposición (superior a 150°C) estos efectos serán de escasa relevancia.

Con el propósito de purificar esta corriente de reciclaje (aislar el etanol) en la T-402 es necesario introducirla como líquido saturado, por lo que la condensación se realiza en el intercambiador de calor E-401. El balance de materia al intercambiador es trivial, dado que el proceso de enfriamiento no se realiza de manera directa con un *quench*, por ejemplo. Se resume en la tabla 21:

Tabla 21: Balance de materia al intercambiador de calor E-401

Flujo másico (kg/h)	Corriente 17	Corriente 20
Etanol	3652.20	3652.20
Acetaldehído	0.00	0.00
Acetato de etilo	0.00	0.00
Hidrógeno	0.00	0.00
Acetaldehído	53.09	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00
TOTAL	3705.29	3705.29

El balance de energía para la operación del tambor flash V-401 se adjuntan en la tabla 22; los compuestos orgánicos se vaporizan aprovechando la depresión a la que se ven sometidos, pero como el proceso de estrangulamiento se realiza a entalpía constante la temperatura no varía (bajo la suposición de gas ideal, altamente acertada teniendo en cuenta las bajas presiones de trabajo en esta zona de la planta de proceso). Bajo la 1ª Ley de la Termodinámica, la energía (considerada como entalpía) de las corrientes de salida del tambor flash ha de ser igual a la energía de la entrada.

Tabla 22: Balance de energía al depósito flash V-401

Parámetros balance de energía	Valor
$C_{p,16}$ (kJ/kg K)	1.616
$C_{p,17}$ (kJ/kg K)	1.604
$C_{p,18}$ (kJ/kg K)	1.67
H_{16} (kJ/kg)	714.45
H_{17} (kJ/kg)	579.75
H_{18} (kJ/kg)	134.70
Comprobación cierre ($H_{16}-H_{17}-H_{18}$)	0

Para el intercambiador de calor E-401, la aplicación del balance de energía se realiza en dos etapas diferentes: la primera, sensible, de enfriamiento del vapor sobrecalentado a vapor saturado y la segunda, latente, de condensación hasta el punto de burbuja (diferente al punto de rocío) con una mayor importancia:

Tabla 23: 1ª etapa del E-401, de enfriamiento del vapor recalentado hasta vapor saturado

Parámetros balance	Valor
$m_{17}=m_{20}$ (kg/h)	3705.28
$\overline{C_p}$ (kJ/kg K)	1.59
T_{17} (K)	351.18
$T_{\text{rocío}}$ (K)	342.36
$Q_{1 \text{ E-401}}$ (kW)	14.38

La segunda etapa, de condensación de la corriente, tiene una mayor importancia relativa: el 98.5% del calor liberado por la mezcla de productos se debe a la etapa de condensación.

Tabla 24: 2ª etapa del E-401, de condensación hasta líquido saturado

Parámetros balance	Valor
$m_{17}=m_{20}$ (kg/h)	3705.28
λ_{vap} (kJ/kg)	875.2
$Q_{2 \text{ E-401}}$ (kW)	900.80

Una vez calculados todos los requerimientos energéticos se puede determinar mediante el cierre del balance de energía la cantidad de utilidad para operativizar el E-401; como fluido de servicio se utiliza agua de enfriamiento:

Tabla 25: Utilidades para satisfacer los requerimientos energéticos del E-401

Cierre balance E-401	Valor
Q_{E-401} (kW)	915.18
$C_{p,cw}$ (kJ/kg K)	4.18
$T_{ent,cw}$ (K)	298.15
$T_{sal,cw}$ (K)	318.15
$m_{cw\ E-401}$ (kg/h)	39409.29

10. Columna de destilación T-402

La columna de destilación T-402 se introduce bajo la necesidad de purificar el etanol antes de recircularlo a la sección 100 para que se mezcle con la alimentación fresca. Bajo el punto de vista del equilibrio líquido-vapor, el etanol y el acetaldo poseen coeficientes de distribución bastante diferentes, generando un factor de separación (volatilidad relativa) que posibilita su separación siguiendo una destilación tradicional en pocas etapas.

Por este motivo se define una separación ideal, la cual se ve ratificada en el simulador Hysys utilizando como modelo termodinámico NRTL (*Non-Random Two Liquids*). Los resultados del balance de materia a la torre T-402 se presentan en la tabla 26:

Tabla 26: Balance de materia a la torre T-402 de purificación de la corriente de reciclo

Flujo másico (kg/h)	Corriente 21	Corriente 22	Corriente 23
Etanol	3652.20	3652.20	0.00
Acetaldehído	0.00	0.00	0.00
Acetato de etilo	0.00	0.00	0.00
Hidrógeno	0.00	0.00	0.00
Acetaldo	53.09	0.00	53.09
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00	0.00
TOTAL	3705.29	3652.20	53.09

De un simple vistazo se puede observar que cierra el balance de materia, puesto que la suma de las salidas (corrientes 22 y 23) es igual a la alimentación (corriente 21). En lo tocante al balance de energía, la ecuación a utilizar es la 10 sin el término asociado al *entrainer*, puesto que en este caso se lleva a cabo una destilación tradicional. Con el propósito de cerrar el balance de energía se calcula el *duty* del calderín de fondos:

Tabla 27: Balance de energía a la torre de purificación T-402

Parámetros balance	Valor
Temperatura de referencia (K)	334.65
$C_{p,21}$ (kJ/kg K)	3.45
$C_{p,22}$ (kJ/kg K)	3.55
$C_{p,23}$ (kJ/kg K)	2.66
T_{22} (K)	350.99
T_{23} (K)	44.15
Razón de reflujo, R	0.02
V (kg/h)	3725.24
$-\lambda_{vap}$ (kJ/kg)	-836.1
$Q_{c\ T-402}$ (kW)	-865.22
$Q_{R\ T-402}$ (kW)	928.45

Puesto que la temperatura en el calderín de fondos coincide con el punto de ebullición del acetaldol a presión atmosférica (171°C), basta con utilizar vapor de media presión a 200°C como utilidad. En la siguiente tabla se especifican los requerimientos energéticos de la columna de destilación T-402:

Tabla 28: Utilidades necesarias para cumplimentar los "duties" de la T-402

Utilidades balance	Valor
$C_{p,cw}$ (kJ/kg K)	4.18
$T_{ent,cw}$ (K)	298.15
$T_{sal,cw}$ (K)	318.15
$m_{cw\ T-402}$ (kg/h)	37256.86
$\lambda_{vap,mps}$ (kJ/kg)	1938.6
$m_{mps\ T-402}$ (kg/h)	1724.03

11. Columna de destilación T-403

La columna de destilación T-403 se introduce con la finalidad de purificar el acetato de etilo obtenido en la etapa de reacción. Por cabezas de la T-401 sale una corriente rica al >96 %wt en el producto deseado, pero esta especificación no cumple los requerimientos demandados por el mercado. El factor de separación para separar el acetato de etilo del etanol por destilación tradicional es elevado, por lo que en pocas etapas se consigue el objetivo buscado.

En este caso, la característica del destilado que se estima es que la corriente de producto satisfaga la capacidad horaria de diseño de la planta de producción. Teniendo esto en cuenta y buscando una calidad superior al 99.8%, se constata en Hysys la factibilidad de

la separación estipulada. Así, el balance de materia externo para la torre de purificación de producto se presenta en la tabla 29:

Tabla 29: Balance de materia a la torre de purificación T-403

Flujo másico (kg/h)	Corriente 14	Corriente 24	Corriente 25
Etanol	0.00	0.00	0.00
Acetaldehído	208.76	198.04	10.72
Acetato de etilo	6318.82	5.69	6313.13
Hidrógeno	0.00	0.00	0.00
Acetaldol	0.00	0.00	0.00
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00	0.00
TOTAL	6527.58	203.73	6323.85

Una vez más, el balance cierra de manera coherente puesto que la suma de las salidas (corrientes 24 y 25) iguala al flujo másico de alimentación (corriente 14).

En tanto al balance de energía, el fundamento es idéntico al desarrollado para la torre de purificación de reciclo, T-402. Los resultados obtenidos para este caso se presentan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 30: Balance de energía a la T-403

Parámetros balance	Valor
Temperatura de referencia (K)	341.36
$C_{p,14}$ (kJ/kg K)	2.10
$C_{p,24}$ (kJ/kg K)	2.26
$C_{p,25}$ (kJ/kg K)	2.12
T_{24} (K)	293.46
T_{25} (K)	349.89
Razón de reflujo, R	4.87
V (kg/h)	1195.89
$-\lambda_{vap}$ (kJ/kg)	-583.5
$Q_{C\ T-403}$ (kW)	-193.83
$Q_{R\ T-403}$ (kW)	219.46

La temperatura de fondos del calderín coincide con el punto de ebullición del acetato de etilo a presión cuasi-atmosférica, por lo que como utilidad para el *reboiler* se empleará vapor de baja presión, Ips, a una temperatura de 120°C y una presión aproximada de 2 bar. En lo tocante a cabezas de la columna puesto que la temperatura es inferior a la temperatura del agua de enfriamiento, será necesario utilizar agua de refrigeración, rw, a 10°C con una temperatura máxima de retorno de 15°C. Las utilidades necesarias para satisfacer los requerimientos energéticos de operación de la T-403 son:

Tabla 31: Suministro de utilidades para la operación de la T-403

Utilidades balance	Valor
$C_{p,rw}$ (kJ/kg K)	4.18
$T_{ent,rw}$ (K)	283.15
$T_{sal,rw}$ (K)	288.15
$m_{rw\ T-403}$ (kg/h)	33387.79
$\lambda_{vap,lps}$ (kJ/kg)	2202.2
$m_{lps\ T-403}$ (kg/h)	219.46

12. Balance de materia global

La última misión a cumplir por parte de este primer anexo a la Memoria es demostrar que el Principio de Conservación de la Materia se cumple para un sistema en el que el volumen de control es toda la planta de producción de acetato de etilo.

Como entrada al sistema se considera únicamente la corriente de alimentación, al 97.94 wt% en bioetanol, siendo las salidas la corriente de subproductos (hidrógeno gas puro libre de CO_x), las corrientes de salida de la torre de purificación de producto T-403 (por cabezas sale un efluente rico en acetaldehído que se dirige a tratamiento de residuos y por colas las corriente al 99.8% en acetato de etilo) y la corriente de efluente (acetaldol puro) que sale por colas de la torre de purificación de reciclo T-402.

Lo propuesto en el párrafo anterior se resume en la siguiente tabla:

Tabla 32: Flujos másicos (kg/h) de las entradas y salidas del volumen de control (planta de producción)

Compuesto	1	10	23	24	25
Etanol	6733.46	0.00	0.00	0.00	0.00
Acetaldehído	141.85	0.00	0.00	198.04	10.72
Acetato de etilo	0.00	0.00	0.00	5.69	6313.13
Hidrógeno	0.00	294.65	0.00	0.00	0.00
Acetaldol	0.00	0.00	53.09	0.00	0.00
[emim][MeSO ₃]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	6875.31	294.65	53.09	203.73	6323.85

Para comprobar que el balance cierra, se suman las corrientes de salida (10, 23, 24 y 25) y se compara el valor con la corriente de entrada:

Tabla 33: Comprobación del cierre del balance de materia

Flujo respecto al sistema	Valor (kg/h)
Corrientes de entrada	6875.31
Corrientes de salida	6875.31

En la tabla 33 se puede observar como se cumple el principio de conservación de la materia.

ANEXO II. CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Contenido

1.	Alcance	3
2.	Reactor catalítico R-201	4
2.1	Teoría de catalizadores	4
2.1.1	Etapas de una reacción catalítica heterogénea	5
2.1.2	Leyes de velocidad para reacciones químicas heterogéneas: modelos LHHW.....	7
2.1.3	Isotermas de Langmuir.....	7
2.2	Protocolo de actuación	8
2.3	Catalizador escogido para la deshidrogenación de EtOH a acetato de etilo	9
2.3.1	Caracterización fisicoquímica.....	10
2.4	Estudio cinético del sistema reactivo	11
2.4.1	Reacciones que tienen lugar	12
2.4.2	Mecanismo de reacción	13
2.4.3	Estudio de limitaciones de transferencia de materia.....	15
2.4.4	Desarrollo de los modelos LHHW.....	18
2.4.5	Parámetros del modelo.....	19
2.5	Cálculos previos al diseño del reactor R-201	23
2.5.1	Modelado unidimensional de las ecuaciones de diseño.....	23
2.5.2	Balances de energía al reactor de lecho fijo	25
2.5.3	Resolución simultánea de ecuaciones de diseño y balances de energía	30
2.6	Diseño del reactor R-201.....	38
2.6.1	Determinación del número de tubos	38
2.6.2	Caída de presión de la mezcla reaccionante a través del lecho.....	39
2.6.3	Determinación del diámetro de la carcasa	42
2.6.4	Caída de presión del fluido calefactor a través de la carcasa	45
2.7	Selección del material de construcción.....	47
2.7.1	Definición de índices de material.....	48
2.7.2	Aplicación de restricciones.....	51
2.7.3	Características del material de construcción seleccionado	53
2.8	Diseño mecánico	54
2.8.1	Consideraciones generales de diseño: condiciones de operación y materiales .	55
2.8.2	Determinación de espesores mínimos.....	56
2.8.3	Análisis de tensiones y diseño del soporte del reactor R-201	61
2.9	Dimensionamiento de la válvula de alivio.....	70
3.	Dimensionamiento básico del resto de equipamiento	74
3.1	Diámetro de las conducciones	74

3.2	Bombas centrífugas.....	77
3.3	Intercambiadores de calor	80
3.4	Tanques flash	82
3.5	Columnas de destilación	84
3.6	Compresores	89
4.	Bibliografía	90

1. Alcance

En este segundo anexo a la Memoria se presenta de manera minuciosa la metodología de cálculo involucrada en el diseño riguroso del reactor catalítico R-201, explicitando las ecuaciones fundamentales para su dimensionado y los resultados obtenidos, que se defenderán en base a la bibliografía consultada.

Para completar la información aportada se realiza una selección justificada del material de construcción a utilizar, basándose en criterios asumidos como correctos por la industria. Finalmente, mediante el diseño mecánico se determina el espesor del equipamiento siguiendo las directrices del código empleado, así como otras cuestiones relativas al análisis de tensiones.

Asimismo, con fines presupuestarios se realizará un dimensionamiento básico del resto del equipamiento principal en el último punto del presente anexo. Se adjunta al final del diseño riguroso del reactor catalítico heterogéneo R-201 dado que los diseños se van a basar en estimaciones, correlaciones gráficas y heurísticas; el único objetivo es conseguir un valor más o menos acertado del parámetro de diseño S que permite estimar el coste del equipamiento según lo establecido en el Documento V. Presupuesto.

2. Reactor catalítico R-201

Según lo establecido en la Rúbrica para la evaluación del Trabajo Fin de Grado, es obligatorio aplicar métodos rigurosos de diseño a una de las unidades fundamentales de la planta de producción sobre la que diserta el documento. Dado que la alternativa aquí presentada (que cumplimenta la deshidrogenación empleando un único reactor, en contraposición a la técnica presentada por Colley et al.) se basa en el uso de un catalizador que propicia unos valores de selectividad en el producto elevados se ha decidido realizar el dimensionado preciso de esta unidad al ser el elemento diferencial con respecto a las otras alternativas presentadas en la memoria.

2.1 Teoría de catalizadores

La primera definición de catalizador fue introducida por J.J Berzelius en 1836: es una sustancia que afecta la velocidad de reacción de un determinado proceso, pero que emerge del proceso sin haber experimentado cambios puesto que no se involucra en el ecosistema reactivo. De manera habitual un catalizador cambia la velocidad de reacción promocionando una ruta molecular diferente, propiciando un mecanismo diferente al disminuir la energía de activación asociada a la cinética de una determinada reacción.

El empleo de un catalizador se justifica en tanto a dos puntos fundamentales: bien sea para mejorar las condiciones de proceso (posibilitar la operación a temperaturas y presiones más bajas) o bien para mejorar la selectividad hacia los productos deseados. Sin embargo, lo que hay que tener presente es que un catalizador lo único que cambia es la velocidad de reacción sin afectar al equilibrio, cuyo control depende únicamente de la termodinámica.

El catalizador se puede encontrar en la misma fase que la mezcla reaccionante, hablando entonces de catálisis homogénea, o en una diferente, catálisis heterogénea, que es el caso más habitual a escala industrial. En este tipo de reacciones existen dos factores que complican su modelización matemática: la mayor complejidad en la ley de velocidad, puesto que contendrá términos relativos a la transferencia de materia en adición a los términos cinéticos y el patrón de contacto, que se infiere a partir de los mecanismos teóricos que se deducen para una determinada reacción. No obstante, la separación simple y completa de la mezcla reaccionante (un fluido) del catalizador sólido posibilita que la catálisis heterogénea sea una operación altamente atractiva desde un punto de vista económico a escala industrial.

Hoy en día, la selección de un catalizador para potenciar una determinada reacción se sigue basando en una metodología de ensayo-error; no obstante, más allá de la composición química es coherente afirmar que la estructura física del sólido -superficie del compuesto- también juega un rol fundamental a la hora de definir la actividad catalítica. De hecho, el diseño de un catalizador es una combinación de tres propiedades interdependientes entre ellas: propiedades químicas-catalíticas (actividad, selectividad al producto deseado y estabilidad con respecto a la desactivación), propiedades físicas

(área superficial, porosidad, acidez, composición y densidad) y propiedades mecánicas (resistencia y atrición).

Sin embargo, un entramado catalítico no consta únicamente de los agentes catalíticos, sino que puede contener otros componentes en su formulación destinados a mejorar su rendimiento:

- Soportes: materiales con elevada área superficial que facilitan la dispersión y estabilidad del agente catalítico, de tal manera que se minimiza la aglomeración en zonas puntuales del compuesto activo.
- Promotores: aditivos que se añaden con el fin de mantener la integridad estructural del soporte y/o del agente catalítico y para mejorar la actividad (aumentar conversiones) y selectividad (sobre el producto deseado).

Otro aspecto a tener en cuenta es que la mayor parte de los catalizadores no mantienen sus niveles de actividad en los mismos guarismos durante periodos indefinidos de tiempo; son susceptibles al fenómeno conocido como desactivación, que se puede dividir en tres clases diferentes:

- Sinterización: pérdida de área superficial activa debido a la exposición prolongada a un fluido gaseoso que se encuentra a elevada temperatura, provocando la aglomeración de los metales depositados en el soporte o estrechando los poros en el interior de la partícula (*pellet*) del catalizador.
- Coquización: la desactivación por *coking* consiste en la deposición de material de carbono en la superficie del catalizador, habitualmente en reacciones que involucran hidrocarburos. Es un fenómeno que se reduce de manera sustancial cuando se dispone de H_2 a elevadas presiones (>15 bar) puesto que autoregenera el catalizador al reducir los compuestos de carbono.
- Envenenamiento: adsorción química irreversible de moléculas que envenenan la superficie del catalizador, reduciendo consecuentemente el número de centros activos (puntos en la superficie catalítica que puede formar enlaces químicos fuertes con los átomos/moléculas adsorbidos) disponibles para las reacciones. Existen leyes empíricas para estudiar el decaimiento de actividad debido a este tipo de desactivación.

2.1.1 Etapas de una reacción catalítica heterogénea

A continuación, se introduce en la figura 1 el esquema que incluye las diferentes etapas que ocurren en una reacción química heterogénea, puesto que en función de la importancia relativa de cada una de ellas la expresión de la ley de velocidad adoptará una forma u otra, según los estudios de Hougen y Watson. Es importante tener ya en consideración que la velocidad global de reacción será la de la etapa más lenta del mecanismo (paso controlante).

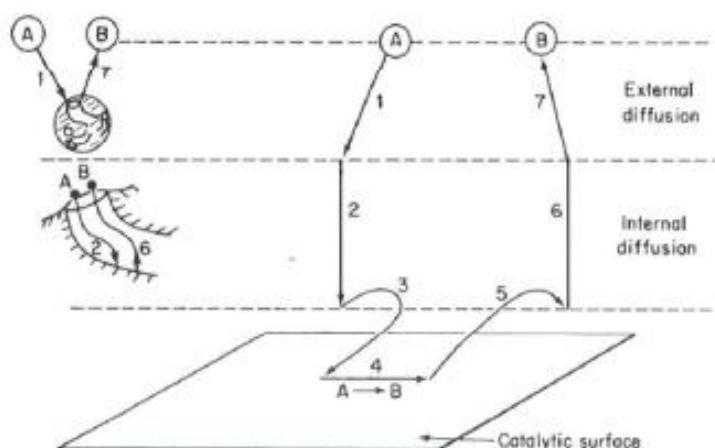


Figura 1: Las siete etapas genéricas de una reacción química heterogénea (Fogler)

Las etapas 1 y 7 hacen referencia a cuestiones relativas a la transferencia de materia: de reactivos desde el seno del fluido a la superficie externa de la partícula de catalizador y de productos desde el exterior del catalizador al fluido respectivamente. Básicamente se engloban en fenómenos de difusión externa, donde reactivos y productos han de atravesar una capa límite teórica que es la causante de la resistencia a la transferencia de materia.

Las etapas 2 y 6 hacen referencia a fenómenos de difusión interna: de los reactivos desde el exterior de la superficie del catalizador a través de los poros hasta llegar a las inmediaciones de los centros activos internos y de los productos desde el interior del *pellet* hacia la boca del poro en la superficie externa. Tanto para el caso de difusión interna como de difusión externa existen criterios empíricos para comprobar si estos fenómenos tienen influencia en las expresiones matemáticas que conforman las leyes de velocidad.

La etapa 3 se refiere a la adsorción de los reactivos en la superficie del catalizador en un centro activo vacío, puesto que de ningún otro modo se produciría la reacción química. Si la molécula se adsorbe en un único centro activo, se habla de adsorción molecular; si por la contra los diferentes átomos constituyentes se adsorben en diferentes centros activos se habla de adsorción disociativa. La etapa 5 hace referencia a la desorción de los productos de reacción, que tras experimentar la reacción química se desorben a la fase fluida.

La etapa 4 sintetiza la reacción química que tiene lugar en la superficie activa después de la etapa de adsorción; existen diferentes formas de reaccionar para dar lugar el producto:

- Sitio único: únicamente el centro activo donde los reactivos se adsorben interviene en la reacción.

- Sitio dual: existe una interacción del reactivo adsorbido con otro centro activo vacío para formar el producto. Esta clasificación también contempla aquellos casos en los que hay reacción entre dos compuestos adsorbidos en sitios activos diferentes.
- Eley-Rideal: es un mecanismo en el que se produce una reacción de los reactivos adsorbidos con moléculas que están libres en la fase fluida.

2.1.2 Leyes de velocidad para reacciones químicas heterogéneas: modelos LHHW
Se introducen en este apartado teórico los modelos de Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson puesto que las expresiones cinéticas para reacciones catalíticas heterogéneas suelen adoptar la siguiente forma general, introducida teóricamente por los científicos ya mencionados:

$$r' = \frac{[\text{término cinético}] \cdot [\text{fuerza impulsora}]}{[\text{término equilibrios adsorción}]^n} \quad (1)$$

donde n hace referencia al número de centros activos involucrados en la reacción.

Para poder inferir leyes de velocidad que sigan la morfología de los modelos LHHW a partir de datos experimentales es necesario trabajar en unas condiciones tales que las etapas de difusión (tanto externa como interna) no supongan una limitación a la velocidad del proceso global. Una vez se ha constatado que la transferencia de materia no controla la velocidad de reacción se considera que para que ocurra la reacción es necesaria la adsorción de al menos uno de los reactivos y que la fracción de las sustancias adsorbidas se modelizan siguiendo el criterio de la Isoterma de Langmuir.

Finalmente, en función de la etapa más lenta (*controlling step*) se desarrolla el modelo de una forma u otra: si el paso crítico es la reacción química se asume que se alcanza el equilibrio de adsorción-desorción; si la etapa controlante es la adsorción o la desorción esto implica que el equilibrio no se alcanza puesto que la reacción ocurre muy rápidamente.

2.1.3 Isotermas de Langmuir

En un proceso de adsorción los iones/átomos/moléculas en fase fluida experimentan un proceso de difusión hacia la superficie activa del sólido, donde se acoplan a los centros activos por fuerzas intermoleculares de la magnitud de las fuerzas de van der Waals (adsorción física caracterizada por interacciones débiles) o por interacciones fuertes del orden de enlace químico (adsorción química o quimisorción).

La isoterma de Langmuir es la expresión más simple y más comúnmente empleada para modelizar la adsorción en una sola capa. Las suposiciones que se realizan para su aplicación son las siguientes: las moléculas de gas son adsorbidas en puntos discretos de la superficie del catalizador (centros activos) que solo pueden albergar una determinada sustancia, la superficie es homogénea energéticamente (lo cual deriva en

que la adsorción no tiene sitios preferenciales sino que todos los centros activos tienen las mismas probabilidades de albergar un compuesto químico independientemente de que los sitios vecinos estén ocupados. Esto es consecuencia de asumir que la interacción entre las moléculas de adsorbato es despreciable), la máxima cantidad de adsorbato se corresponde con la de la monocapa llena, la ocupación de un centro activo ocurre como resultado de una colisión entre una molécula de adsorbato y el sitio activo vacío y la velocidad de desorción depende únicamente de la cantidad de adsorbato en la superficie activa.

Para la adsorción de una única especie química, la expresión de la isoterma de Langmuir se deduce partiendo de que en el equilibrio la velocidad de adsorción (proporcional a la presión parcial de compuesto y al número de centros activos vacíos) es igual a la velocidad de desorción (proporcional a la cantidad de adsorbato en la superficie). Definiendo los centros activos ocupados por una molécula de A con respecto a la totalidad de los sitios activos como θ_A , la expresión matemática de lo expresado en este párrafo resulta:

$$K_{ads} \cdot P_A \cdot (1 - \theta_A) = K_{des} \cdot \theta_A \quad (2)$$

Especificando el cociente entre la constante de adsorción y de desorción como K_A y reordenando términos, se obtiene finalmente la expresión de la isoterma de Langmuir:

$$\theta_A = \frac{K_A \cdot P_A}{1 + K_A \cdot P_A} \quad (3)$$

La metodología aquí introducida es la que se seguirá para deducir los modelos de Hougen-Watson que conforman las leyes de velocidad a utilizar para el diseño del reactor catalítico R-201.

2.2 Protocolo de actuación

Una de las principales tareas de la ingeniería de la reacción química es analizar los datos y desarrollar una ley de velocidad que pueda aplicarse al diseño de reactores. En catálisis heterogénea estas leyes casi nunca siguen modelos de potencia, por lo que inherentemente es más difícil formularlas a partir de la experimentación. Para desarrollar una comprensión profunda acerca de la elaboración de las leyes de velocidad en catálisis homogénea se opta por seguir otra estrategia de actuación.

El camino se dirige pues hacia el postulado teórico de posibles mecanismos catalíticos (teniendo en cuenta las etapas introducidas en la figura 1) para después derivar las leyes de velocidad correspondientes; el mecanismo ha de incluir un paso de adsorción, uno de reacción superficial y otro de desorción, siendo uno de ellos el limitante de la velocidad global. Sugerir un posible mecanismo y el paso controlante de primeras no es el comienzo intuitivo una vez se dispone de los datos experimentales, pero al derivar ecuaciones para los diferentes casos se pueden observar las distintas formas que llegan a adoptar las expresiones de velocidad en catálisis heterogénea.

Conociendo las diversas formas que pueden tener las ecuaciones de velocidad catalítica, será más fácil cotejar las tendencias en los datos y deducir la ley adecuada. Esta deducción suele realizarse en primer término a nivel industrial antes de proponer un mecanismo; conociendo la forma de la ley de velocidad se pueden evaluar numéricamente los parámetros de la misma con el fin de postular el mecanismo de reacción riguroso y el paso limitante de la velocidad, ambos congruentes con los datos de velocidad. Con las expresiones obtenidas se pueden diseñar los reactores catalíticos a partir de las ecuaciones de diseño (balances de materia) y de los balances de energía.

Este procedimiento, basado en la metodología introducida por el *Fogler – Elementos de ingeniería de las reacciones químicas* se muestra de manera gráfica como algoritmo en la figura 2, donde las líneas punteadas representan *feedback* para obtener nuevos datos en regiones específicas con el fin de evaluar los parámetros de la expresión de velocidad de manera más precisa o para escoger el mecanismo de reacción adecuado.

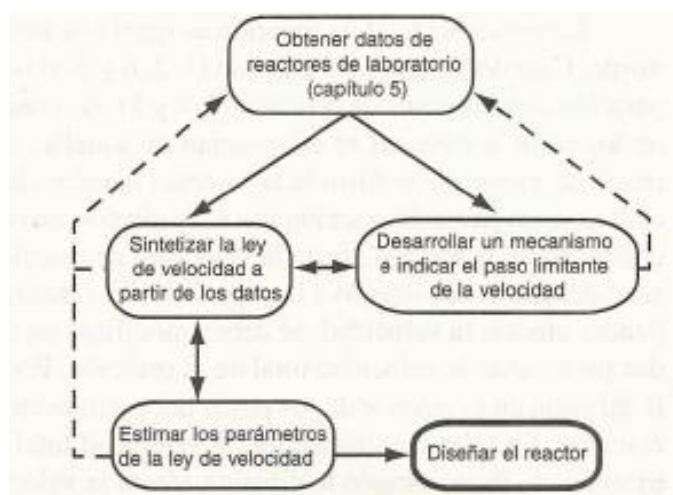


Figura 2: Protocolo de actuación para el diseño de reactores catalíticos (Fogler)

2.3 Catalizador escogido para la deshidrogenación de EtOH a acetato de etilo
Como se ha indicado en la Memoria de este Trabajo Fin de Grado, la elección de uno u otro catalizador va a tener una enorme influencia en el diseño de la planta de producción de acetato de etilo, por lo que en este punto del Anexo II se indicará información acerca del catalizador escogido, cuya justificación está recogida en el punto 6. *Selección justificada de la alternativa de producción: proceso, reactivos, catalizador y sección de separación* perteneciente a la Memoria; esta elección se fundamenta básicamente en tres puntos fundamentales:

- Máxima actividad posible, puesto que la conversión del etanol es la máxima obtenible en condiciones de equilibrio termodinámico.
- Una selectividad superior al 98% lo que permite operativizar la planta de producción con un único reactor.

- Una gran estabilidad, viéndose apenas perjudicado por fenómenos de desactivación (en cierto modo auspiciada por la obtención de H_2 como subproducto, que limita el fenómeno de coquización).

2.3.1 Caracterización fisicoquímica

El catalizador en cuestión responde al nombre de Cu-1234-1/16 F comercializado por la casa BASF (es el catalizador que se utiliza de manera clásica en la industria para la reducción selectiva de ácidos grasos a alcoholes grasos), que consiste en un entramado de cobre, óxido de cobre y cromito de cobre en su forma pre-reducida soportado sobre alúmina y empleando cromato de bario como promotor (una pequeña modificación sobre el clásico catalizador de Adkins). La composición del mismo, según la distribuidora comercial es $CuCr_2O_4/CuO/Cu/BaCrO_4/Al_2O_3$ (45:1:13:11:30 %wt); puesto que se trata de una forma pre-reducida es muy posible que el promotor se presente realmente en la forma BaO/Cr_2O_3 . En tanto a su morfología se caracterizan por ser gránulos en forma cilíndrica con un diámetro de 1.8 mm y una altura variable que oscila entre 3 y 5 mm.

La presencia de la pequeña cantidad de óxido de cobre se justifica en tanto a la oxidación superficial inducida por la propia distribuidora con el propósito de estabilizar el catalizador en las etapas previas a su uso.

La caracterización del catalizador fue llevada a cabo por Santacesaria et al. utilizando técnicas clásicas: por ejemplo, para determinar la superficie específica de Cu y la dispersión de este metal se ha empleado el método de adsorción química de N_2O , para determinar la acidez y la basicidad se han llevado a cabo desorciones de NH_3 y CO_2 respectivamente y la superficie específica se ha determinado mediante las isothermas de Brunauer-Emmet-Teller (BET) de N_2 a 77 K, bajo la suposición de no homogeneidad energética de la superficie activa, adsorción química de la primera capa y adsorción física mediante interacciones de van der Waals de las capas adyacentes e igual velocidad de adsorción para las diferentes capas. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 1:

Tabla 1: Caracterización física del BASF Cu-1234-1/16 F

Superficie específica	Volumen poros	Dispersión cobre	Superficie cobre
127 m ² /g	0.41 cm ³ /g	1.22%	2.05 m ² /g

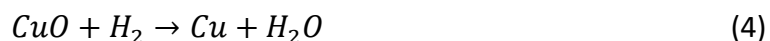
En tanto a la distribución de los poros (% en volumen), los resultados se resumen en la tabla 2:

Tabla 2: Resumen de las cavidades porosas del catalizador escogido en tanto a su ocurrencia y tamaño

r < 20 Å	20 Å < r < 1000 Å	r > 1000 Å
12.27	83.84	3.90

El valor tan elevado de superficie específica se justifica en tanto a la participación del soporte de alúmina, cuya presencia también influye en los valores bajos de dispersión

de Cu y área superficial de cobre, dado que una de sus misiones fundamentales es la de mantener bien dispersas las partículas de cromito de cobre. El catalizador también ha sido sometido a un proceso de reducción térmica programada (TPR: *Thermal Programmed Reduction*) con hidrógeno con el propósito de evaluar el grado de reducibilidad de los compuestos cuprosos con Cu^{2+} según dos reacciones diferentes. La primera afecta al óxido de cobre:



La ruta de reducción es la que caracteriza al cromito de cobre, en la que el Cu formado crece de manera epitaxial (en láminas) sobre la superficie espinela, mientras que los protones liberados (ambiente ácido) toman el lugar del Cu^{2+} en la red cristalina para compensar las cargas negativas:



Por lo tanto, a pesar de la reducción del Cu^{2+} , la estructura en forma de espinela de la red cristalina no se ve perjudicada gracias a la formación de H^+ que ocupan su lugar en el interior del entramado estructural.

Finalmente, los estudios de acidez y basicidad de la superficie catalítica activa han servido para demostrar que la presencia de cromato de bario como promotor no tiene un efecto directo sobre el carácter básico de la muestra. Es probable que durante la etapa de pretratamiento con H_2 (necesaria para activar el catalizador como se puede ver en la tabla 3, puesto que el óxido de cobre ha de ser reducido a cobre metal para optimizar el rendimiento) el BaCrO_4 se redujese a una mezcla de $\text{BaO}/\text{Cr}_2\text{O}_3$, siendo el óxido de bario neutralizado por los centros ácidos de Lewis del óxido de aluminio y del óxido de cromo. Por lo tanto, la forma pre-reducida del catalizador utilizado presenta una estructura particular en tanto a que posee cobre metálico depositado sobre la superficie del cromito próxima a los centros ácidos de Brönsted del cromito de cobre reducido, mientras que el óxido de bario neutraliza la acidez externa.

Se ha demostrado que la presencia de estos centros ácidos de Brönsted (obtenidos mediante la reacción 5) en el interior del cromito de cobre reducido son los causantes de la buena selectividad en acetato de etilo del catalizador estudiado.

Tabla 3: Efecto del tratamiento de reducción sobre el catalizador antes de operación

Tiempo activación (h)	X_{EtOH} (%)	S_{EA} (%)	S_{otros} (%)
10	44.33	96.82	3.17
18	57.35	97.74	2.26

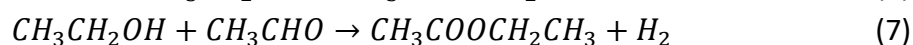
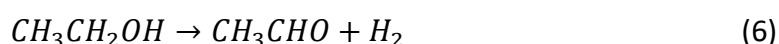
2.4 Estudio cinético del sistema reactivo

Teniendo en cuenta los sorprendentes resultados en tanto a actividad, selectividad y estabilidad del catalizador presentado en el apartado anterior del anexo II, Carotenuto et al. decidieron llevar a cabo un estudio cinético de las reacciones que tienen lugar. Los

parámetros del modelo obtenido proporcionan un ajuste satisfactorio de todos los datos experimentales, con un error estándar por debajo del 15%; para constatar la validez de los resultados obtenidos se han llevado a cabo pruebas con diferentes cargas de catalizador, resultando en un ajuste con un error inferior al 12%, por lo que se concluye que el resultado del estudio cinético proporciona una modelización matemática fiel de las reacciones que tienen lugar en el sistema.

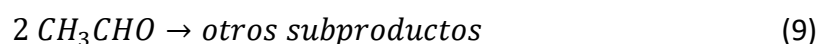
2.4.1 Reacciones que tienen lugar

La formación de acetato de etilo a partir de la deshidrogenación de etanol es consecuencia de dos reacciones consecutivas con la producción de acetaldehído como compuesto intermedio. Las dos reacciones, así como la estequiometría global, se presentan a continuación:



Como se ha explicado en el apartado 9.2 *Condiciones óptimas de operación: estudio termodinámico* de la Memoria, una alta selectividad en acetato de etilo se consigue con una alta velocidad en la reacción (7) para tratar de consumir el máximo acetaldehído posible, reduciendo así su presión parcial en el sistema. Este concepto es altamente importante puesto que el acetaldehído puede seguir una reacción de autocondensación aldólica para dar lugar a una gran variedad de subproductos, disminuyendo la selectividad sobre el producto principal y favoreciendo la desactivación del catalizador por el proceso de coquización.

Con el fin de entender las diferentes conexiones entre compuestos químicos, se ilustra la red de reacción que han propuesto Inui et al. para explicar todas las reacciones que tienen lugar durante la deshidrogenación de etanol. Dado que la selectividad en las reacciones no deseadas es muy pequeña (menor del 2%), se engloban todas estas en la condensación aldólica para dar otros subproductos:



No obstante, como se ha demostrado en el Anexo I. Balances de materia y energía, estos subproductos se pueden agrupar todos como acetaldol, que casualmente es el compuesto químico de “acceso” al cuadro de subproductos mostrado en la figura 3:

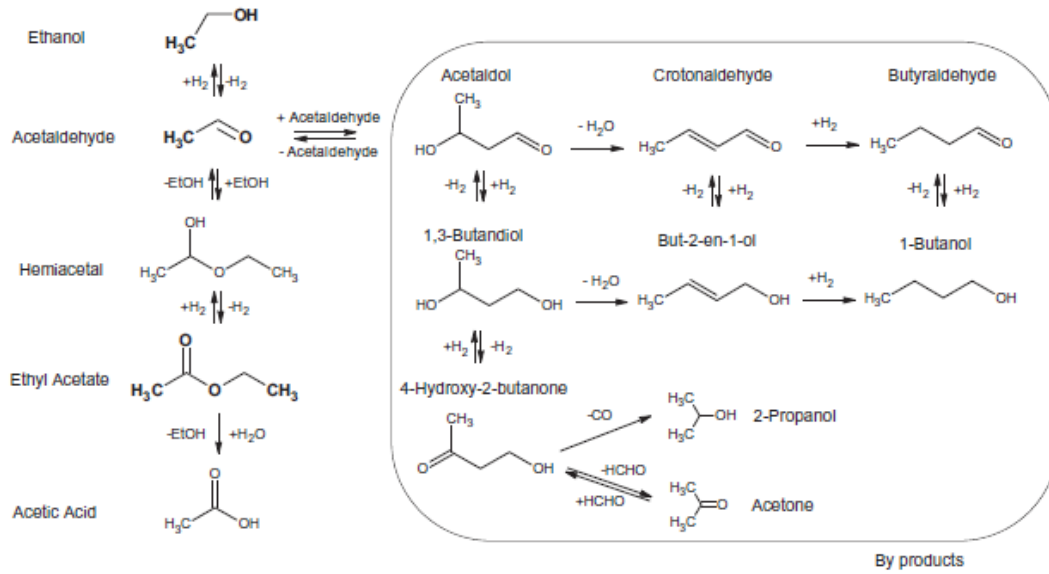


Figura 3: Red de reacción vinculada a la deshidrogenación de etanol (Inui et al.)

Con lo cual las suposiciones basadas en la bibliografía permiten cerrar de manera coherente el balance de materia en el reactor catalítico R-201. El estudio cinético parte de este sistema reactivo, para el cual se desarrollará un mecanismo que permitirá el desarrollo de las leyes de velocidad, siguiendo el procedimiento introducido en el punto 2.2 *Protocolo de actuación* de este anexo II.

2.4.2 Mecanismo de reacción

Partiendo del esquema de reacción anterior, una primera evaluación cinética se realiza empleando leyes de potencia con un fuerte carácter empírico:

$$r_1 = k_1 \cdot P_E^\alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{K_{e1}} \cdot \frac{P_A^\beta \cdot P_H^\gamma}{P_E^\alpha}\right) \quad (10)$$

$$r_2 = k_2 \cdot P_E^\delta \cdot P_A^\epsilon \cdot \left(1 - \frac{1}{K_{e2}} \cdot \frac{P_{EA}^\theta \cdot P_H^\omega}{P_E^\delta \cdot P_A^\epsilon}\right) \quad (11)$$

$$r_3 = k_3 \cdot P_A^2 \quad (12)$$

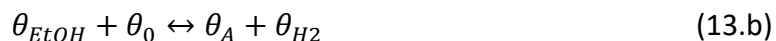
donde los subíndices 1,2 y 3 hacen referencia a las tres reacciones de las que consta el sistema de reacción (deshidrogenación de etanol a acetaldehído, reacción del etanol con el acetaldehído para dar acetato de etilo y autocondensación del acetaldehído para dar acetaldol) y los subíndices E, A, EA y H hacen referencia a los compuestos involucrados: etanol, acetaldehído, acetato de etilo e hidrógeno.

Los superíndices serían los parámetros del modelo basado en leyes de potencia, cuyos mejores valores sugieren fuertemente un mecanismo de reacción en el cual la adsorción de los reactivos y la desorción de los productos jueguen un papel importante; esto es, el modelo basado en la ley de la potencia sugiere que las expresiones cinéticas deben constar de términos que incluyan las presiones parciales de los compuestos involucrados en la reacción en el denominador, según lo estipulado por la reacción (1).

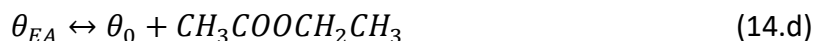
En base a la literatura acerca del tema, la adsorción de hidrógeno en una superficie de cobre puede ocurrir por las dos formas introducidas en el 2.1.1 *Etapas de una reacción catalítica heterogénea*: adsorción molecular y adsorción disociativa. En el caso de la adsorción molecular, el H₂ se acopla a un único centro activo dando lugar a un enlace H-H débil siendo el átomo de hidrógeno que se agrupa en el sitio activo más reactivo; el mecanismo de adsorción disociativa en centros adyacentes también se contempla. Tomando como referencia estas consideraciones, se estudian dos mecanismos diferentes.

Introduciendo una adsorción disociativa (mecanismo de sitio dual), el mejor ajuste de los datos experimentales se ha obtenido considerando la reacción en la superficie catalítica como paso limitante de la velocidad: el error medio es satisfactorio (ligeramente superior al 15%) pero algunos de los parámetros encontrados no tienen significado físico, como por ejemplo algunas energías de activación con valores cercanos a cero. En adición a esto, este mecanismo no es capaz de describir con exactitud los datos experimentales cuando se utilizan diferentes cargas de catalizador.

Por este motivo se propone el mecanismo de adsorción molecular para las dos reacciones principales, en las cuales se centra el estudio puesto que la selectividad en el producto deseado es superior al 98%. Así, para la formación del acetaldehído por la primera reacción, el mecanismo considerado es:



donde θ_0 representa un centro activo vacío. Para la segunda reacción entre el etanol y el acetaldehído el razonamiento crítico que deriva en el mecanismo es similar:



En los dos casos, se asume que se alcanzan los equilibrios de adsorción y desorción por lo que el paso limitante de la velocidad será la deshidrogenación en configuración de sitio dual para la primera reacción y la interacción química entre etanol y acetaldehído (también siguiendo una configuración de dos centros activos) para la segunda reacción.

La tercera reacción, de condensación aldólica de acetaldehído para dar subproductos (reacción 9) ocurre en una cantidad muy pequeña (selectividad inferior al 2%), de ahí que no sea necesario entrar en profundidad y se describa como una reacción irreversible de pseudo-segundo orden.

2.4.3 Estudio de limitaciones de transferencia de materia

Como se ha postulado en 2.1.2 *Leyes de velocidad para reacciones químicas heterogéneas: modelos LHHW*, para determinar las leyes de velocidad a partir de los datos experimentales es necesario trabajar en condiciones experimentales tales que las etapas de difusión no supongan una limitación a la velocidad del proceso global.

El procedimiento habitual consiste en la utilización de técnicas sencillas y de rápida aplicación que permitan realizar una estimación de si las etapas de difusión son el paso limitante en una reacción química catalítica heterogénea: se utilizará el Criterio de Weisz-Prater para el análisis de la difusión interna y el Criterio de Mears para el estudio de la difusión externa.

Se define el factor de efectividad (η) como el parámetro para medir cuánto se reduce la velocidad de una reacción catalítica a consecuencia de la resistencia que presentan los reactivos y productos como resultado de los procesos difusivos que caracterizan la transferencia de materia. Con el fin de evitar que la difusión influya en la velocidad de reacción, lógicamente este factor de efectividad debe ser lo más cercano posible a la unidad.

Para asegurar que $\eta > 0.95$ en una partícula esférica isotérmica para una reacción de primer orden, el Criterio de Weisz-Prater para despreciar los efectos de transporte en el interior de la partícula requiere:

$$\frac{r \cdot R_p^2}{C_0 \cdot D_{eff}} < 1 \quad (15)$$

donde R_p es el radio de los gránulos de catalizador, C_0 es la concentración de reactivo en la superficie externa del gránulo y D_{eff} es el coeficiente de difusividad efectiva que se define a partir del coeficiente de difusión molecular D_{AB} , donde A se refiere a etanol y B a nitrógeno gas y de la difusividad de Knudsen, cuya expresión se introduce como ecuación 16:

$$D_K = \frac{2 \cdot r_p}{3} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M_m}} \quad (16)$$

en donde r_p es el radio del poro. La difusividad de Knudsen solo será significativa cuando se trabaja a bajas presiones y el diámetro del poro es pequeño; su relación con el coeficiente de difusión molecular da lugar a la difusividad combinada:

$$\frac{1}{D_C} = \frac{1}{D_K} + \frac{1}{D_{AB}} \quad (17)$$

Esta difusividad combinada se emplea para calcular D_{eff} , utilizando los conceptos de tortuosidad, constricción y porosidad:

$$D_{eff} = \frac{D_C \cdot \varepsilon \cdot \sigma}{\tau} \quad (18)$$

donde la porosidad ϵ se define como el cociente entre el volumen de espacio vacío en el poro de la partícula con respecto al volumen total, el factor de constricción σ considera la variación en la sección transversal de la galería del poro perpendicular al fenómeno de difusión y la tortuosidad τ es un cociente entre la distancia real entre dos puntos en el interior de una molécula con respecto a la distancia más corta entre los mismos.

Se emplea el concepto de difusividad efectiva en vez de la difusividad molecular dado que los poros de las partículas no son ni rectos ni cilíndricos, sino que consisten en una serie de trayectorias interconectadas y tortuosas que forman parte del cuerpo del poro y de la garganta del mismo, con áreas transversales de paso variables. Por este motivo no es útil describir la difusión dentro de cada una de estas vías de forma individual, sino que se define la D_{eff} para describir la difusión promedio que tiene lugar en cualquier posición dentro del *pellet* de catalizador. Para resolver las ecuaciones 16-18 se consideran las propiedades presentadas en la tabla 4:

Tabla 4: Parámetros necesarios para estipular la difusividad efectiva en los poros de un catalizador

Propiedad	Valor
Porosidad	0.4
Tortuosidad	0.4
Factor de constricción	0.8
D_{AB} (cm ² /min)	6.12
r_p (cm)	0.13
T (K)	493.15
R (J/mol K)	8.314
M_m (kg/mol)	0.046

En el criterio de Weisz-Prater aparece r , la velocidad media de reacción, que se evalúa para los datos experimentales observados mediante la expresión 19:

$$r = \frac{F_E^0 \cdot X_E}{(1 - \epsilon) \cdot W / \rho_B} \quad (19)$$

donde F_E^0 es el flujo molar de etanol al reactor, W la masa de catalizador utilizada, ρ_B la densidad de lecho empacado (es una propiedad característica de cada catalizador y se define como el peso de catalizador por volumen de lecho empacado. En su definición inherente se considera el peso en seco y depende del tamaño y geometría del catalizador, así como de la densidad de los *pellets*) y X_E es la conversión de etanol:

$$X_E = \frac{\text{kmol EtOH reaccionan}}{\text{kmol EtOH alimentados}} \quad (20)$$

Hudgins realizó una aproximación del criterio de análisis para evaluar la importancia de la difusividad interna para reacciones cinéticas de segundo orden, donde el término derecho de la expresión del criterio (ecuación 15) no es la unidad, sino $1/n$ siendo n el

orden de reacción. Calculando el resultado para la mayor velocidad de reacción observada se obtiene un valor de 0.15 como se constata en la figura 4, bien por debajo del límite estipulado; se concluye por lo tanto que la difusión interna no supone una limitación para la velocidad de reacción global.

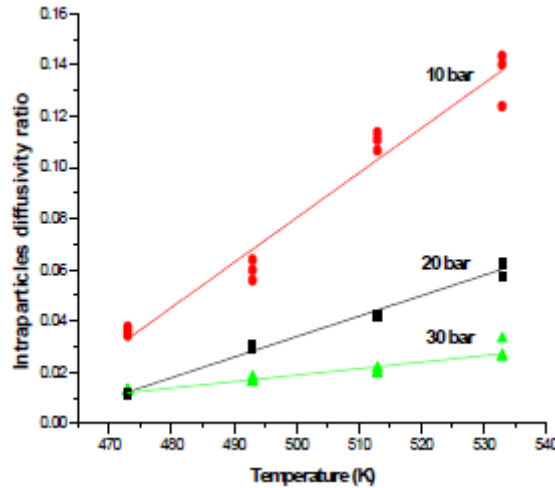


Figura 4: Resultados de la ecuación de Weisz-Prater para los diferentes casos experimentales

Finalmente se evalúan los fenómenos de transferencia de materia en el exterior del *pellet* (difusión externa) aplicando el Criterio de Mears, que propone que los efectos de transferencia másica se pueden despreciar cuando se cumpla lo estipulado por la ecuación 21:

$$\frac{r \cdot \varepsilon \cdot R_p \cdot n}{k_c \cdot C_0} < 0.15 \quad (21)$$

en donde el único parámetro nuevo hasta este momento es el coeficiente de transferencia de materia, k_c , definido en cm/min. Para su evaluación se utiliza la correlación de Thoenes-Kramers, adecuada para las condiciones de flujo a través del lecho empacado:

$$k_c = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{D_{AB}}{2 \cdot r_p} \cdot Sh \quad (22)$$

en donde Sh es el número adimensional de Sherwood que representa el cociente entre la transferencia de masa por convección y por difusión; su conceptualización es análoga al número de Nusselt empleado en transmisión de calor.

El valor más alto calculado empleando el Criterio de Mears es inferior a 0.1 como se puede observar en la figura 5, por lo que los efectos de la difusión externa también se pueden despreciar. Por lo tanto, se ha demostrado que se trabaja en unas condiciones experimentales tales que los procesos de transferencia de materia no suponen un obstáculo a la velocidad de reacción del proceso global: se está en un régimen de cinética intrínseca que permite la deducción acertada de los modelos LHHW.

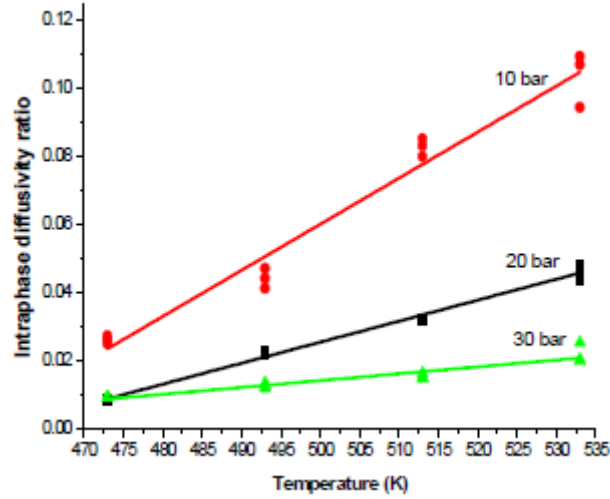


Figura 5: Resultado de la aplicación del criterio de Mears a los datos experimentales

2.4.4 Desarrollo de los modelos LHHW

Partiendo del mecanismo introducido en 2.4.2 *Mecanismo de reacción* asociado al esquema reactivo explicitado en 2.4.1 *Reacciones que tienen lugar* se desarrolla el modelo Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson que matemáticamente ha de proporcionar una buena coherencia entre los datos experimentales y los calculados.

Las leyes de velocidad para las dos reacciones principales son:

$$r_1 = k_1 \cdot \theta_E \cdot \theta_0 - k_{-1} \cdot \theta_A \cdot \theta_H \quad (23)$$

$$r_2 = k_2 \cdot \theta_E \cdot \theta_A - k_{-2} \cdot \theta_{EA} \cdot \theta_H \quad (24)$$

Aplicando un balance sobre los centros activos libres y los ocupados por moléculas adsorbidas se pueden escribir las siguientes relaciones, tras reordenar términos:

$$\theta_0 \cdot (b_E P_E + b_A P_A + b_{EA} P_{EA} + b_{H_2} P_{H_2}) = \theta_E + \theta_A + \theta_{EA} + \theta_{H_2} \quad (25)$$

$$\theta_0 = 1 / (1 + \sum b_i P_i) \quad (26)$$

$$\theta_i = b_i P_i / (1 + \sum b_i P_i) \quad (27)$$

en donde b_i hace referencia a las constantes de equilibrio de adsorción de los diferentes compuestos en los centros activos de la superficie catalítica. Puesto que las expresiones matemáticas de los modelos LHHW responden al esquema presentado en la ecuación 1, se desarrollan las siguientes leyes de velocidad en base a los mecanismos presentados (kmol/kg h):

$$r'_1 = k_1 \cdot \frac{b_E P_E \cdot (1 - \frac{P_A \cdot P_{H_2}}{P_E \cdot K_{e1}})}{(1 + b_E P_E + b_A P_A + b_{H_2} P_{H_2})^2} \quad (28)$$

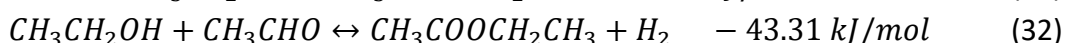
$$r'_2 = k_2 \cdot \frac{b_E P_E \cdot b_A P_A \cdot (1 - \frac{P_{EA} \cdot P_{H_2}}{P_E \cdot P_A \cdot K_{e2}})}{(1 + b_E P_E + b_A P_A + b_{EA} P_{EA} + b_{H_2} P_{H_2})^2} \quad (29)$$

$$r'_3 = k_3 \cdot P_A^2 \quad (30)$$

2.4.5 Parámetros del modelo

El modelo de Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson consta de 14 parámetros (3 constantes cinéticas asociadas a cada reacción junto con las energías de activación correspondientes además de 4 constantes de equilibrio de adsorción y las entalpías asociadas) además de 2 constantes de equilibrio de reacción. En este apartado del Anexo II se explicará la metodología empleada para su determinación, así como los valores obtenidos.

Primeramente, se indicarán las expresiones para las constantes de equilibrio de reacción en consonancia con lo introducido en el punto 9.2 *Condiciones óptimas de operación: estudio termodinámico* de la Memoria. Las principales reacciones de equilibrio y sus calores de reacción estándar asociados son:



Los calores de reacción en condiciones estándar (25°C) se calculan a partir de las entalpías de formación estándar de las sustancias elementales (que se recogen en la tabla 5), respetando en cada caso la estequiometría de reacción que tiene en consideración la diferencia entre reactivos y productos.

$$\Delta H_{Rj}^0 = \sum v_i \cdot \Delta H_{fi}^0 \quad (33)$$

en donde v_i hace referencia al coeficiente estequiométrico de la sustancia elemental en la reacción correspondiente (valor negativo para reactivos, positivo para productos).

Tabla 5: Entalpías de formación en condiciones estándar

Sustancia	ΔH_f^0 (kJ/mol)
Etanol	-166.10
Acetaldehído	-234.81
Acetato de etilo	-444.21
Hidrógeno	0

La reacción global, que resulta de sumar las ecuaciones de las reacciones químicas 31 y 32, es moderadamente endotérmica (25.4 kJ/mol).

Para evaluar las constantes de equilibrio de las dos reacciones reversibles (K_{e1} y K_{e2} respectivamente) se utiliza el método de minimización de la energía libre de Gibbs, con el que se determina las composiciones alcanzadas en el equilibrio y se estiman las correspondientes constantes en fase gas. Los efectos de la presión y de la no-idealidad de las mezclas gaseosas se evalúan mediante la adopción del modelo PSRK, basado en ecuaciones de estado.

Las constantes de equilibrio en fase gas se han estimado en el simulador ASPEN determinando la composición de salida de un “reactor de equilibrio” que contiene en un mismo set de reacciones el sistema reactivo. La dependencia de K_{ei} con la

temperatura viene dada por la ecuación de Van't Hoff, cuya linealización deriva en la expresión presentada en la ecuación 34:

$$\ln K_{ei} = A + B \cdot \frac{1}{T} \quad (34)$$

Los valores de las constantes A y B se presentan en la tabla 6; como ya se ha indicado en la Memoria, el análisis termodinámico de Carotenuto et al. presenta sus limitaciones, pero aun así las expresiones de las constantes de equilibrio de reacción obtenidas teóricamente se utilizan en el modelo cinético.

Tabla 6: Parámetros de Van't Hoff para relacionar las constantes de equilibrio con la temperatura

Constante de equilibrio	Parámetro A	Parámetro B
K_{e1}	16.5	-9136.4
K_{e2}	-4.79	4386.0

Una vez especificadas las constantes de equilibrio en función de la temperatura, se procede a la deducción de los 14 parámetros que caracterizan al modelo LHHW, que han sido sujetos a un análisis de regresión matemática involucrando la minimización de una función objetivo que representa un sistema de mínimos cuadrados:

$$RMS = \frac{1}{N} \cdot \sum (a_i^{exp} - a_i^{calc})^2 \quad (35)$$

donde RMS (*Root Mean Square*: media cuadrática) es la función objetivo a minimizar, N el número de datos experimentales obtenidos, a_i^{exp} son los valores experimentales de conversión y selectividad y a_i^{calc} son los valores calculados de los mismos parámetros. La definición de conversión de reactivo se introdujo en la ecuación 20; la selectividad hacia un producto, en base a un balance de carbono para cada componente, se define del modo presentado en la ecuación 36:

$$S_i = \frac{\text{moles compuesto } i \text{ formados}}{\text{moles etanol que reaccionan}} \cdot \frac{n^{\circ} \text{ carbonos compuesto } i}{2} \quad (36)$$

El error medio global se ha calculado utilizando la expresión matemática presentada en la ecuación 37:

$$\text{error (\%)} = \sum_{j=1}^4 \left[\frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_{ji}^{exp} - a_{ji}^{calc}}{a_{ji}^{exp}} \right) \right| \cdot 100 \right] \quad (37)$$

en donde el subíndice j hace mención a la conversión de etanol, selectividad en acetaldehído, selectividad en acetato de etilo y selectividad en otros subproductos respectivamente.

Los parámetros del modelo que minimizan el error de mínimos cuadrados se recogen en las tablas 7, 8 y 9. En adición a este tratamiento de datos, se ha utilizado el índice de

correlación de Pearson ($R^2=0.98$) para estudiar la relación entre el modelo desarrollado y los datos experimentales obtenidos:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE/(NSP - NP - 1)}{SST/(NST - 1)} \quad (38)$$

en donde NSP hace referencia al número total de experimentos, NP al número de parámetros del modelo, SSE representa la diferencia entre los datos experimentales y los calculados (ver ecuación 39) y SST la suma cuadrática de los datos experimentales (ver ecuación 40).

$$SSE = \sum_{i=1}^N (a_i^{exp} - a_i^{calc})^2 \quad (39)$$

$$SST = \sum_{i=1}^N (a_i^{exp})^2 \quad (40)$$

Tabla 7: Constantes cinéticas a 220°C del modelo LHHW

Constantes cinéticas (T=220°C)	Valor
k_1	95.83 kmol/kg h bar
k_2	0.087 kmol/kg h
k_3	0.0011 kmol/kg h bar ²

Tabla 8: Parámetros de adsorción isoterma de los diferentes compuestos involucrados en el sistema reactivo

Constantes de adsorción (T=220°C)	Valor (bar ⁻¹)
b_{ETANOL}	10.26
$b_{ACETALDEHÍDO}$	97.11
$b_{ACETATO DE ETILO}$	40.66
$b_{HIDRÓGENO}$	2.5e-4

Tabla 9: Energías de activación y entalpías de adsorción que regulan el funcionamiento del modelo LHHW

Energías de activación/Entalpías de adsorción	Valor (kJ/mol)
$E_{a,1}$	151.67
$E_{a,2}$	54.18
$E_{a,3}$	1.6e-4
$\Delta H_{ads,ETANOL}$	-106.71
$\Delta H_{ads,ACETALDEHÍDO}$	-29.34
$\Delta H_{ads,ACETATO DE ETILO}$	-58.14
$\Delta H_{ads,HIDRÓGENO}$	-55.76

De los valores presentados en la tabla 7 se puede observar que la reacción secundaria (condensación aldólica del acetaldehído para dar acetaldol) tiene una constante cinética muy pequeña. Esto se puede justificar atendiendo a 3 puntos:

- La aproximación de todas las reacciones secundarias como una reacción irreversible de pseudo-segundo orden, basado en una selectividad muy baja.
- El hecho de que todas las reacciones secundarias se agrupen como la condensación aldólica de acetaldehído para dar otros subproductos.
- La cantidad muy baja de subproductos detectada durante los experimentos debido a la baja precisión en la determinación analítica.

En tanto a las constantes de equilibrio de adsorción presentadas en la Tabla 8, los parámetros del modelo adoptan valores aceptables a excepción del relativo al hidrógeno. Aun así, esta anomalía se puede justificar teniendo en cuenta el hecho de que el catalizador antes de someterse a la reacción catalítica se pre-reduce con hidrógeno y es probable que inicialmente la gran mayor parte de los centros activos estén ocupados con hidrógeno adsorbido; por esta razón es difícil la correcta evaluación de este parámetro en las condiciones del estudio.

Finalmente, en los valores presentados en la Tabla 9 se observa que la energía de activación de la reacción secundaria es prácticamente despreciable; esto está auspiciado por la suposición de cinética de segundo orden y la dificultad de respuesta analítica en las técnicas experimentales para concentraciones tan bajas de los subproductos.

Para concluir este apartado se indica que los parámetros de equilibrio de adsorción se consideran constantes, puesto que su dependencia con la temperatura en el rango de operación del reactor no es significativa. Por la contra, se expresan las constantes cinéticas siguiendo un arreglo de Arrhenius donde se muestra la dependencia de este parámetro con respecto a la temperatura de reacción, tal y como muestra la ecuación 41:

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}} \quad (41)$$

en donde A es el factor preexponencial, que básicamente es una medida de la frecuencia de las colisiones que causan la reacción química y E_a es la energía de activación, o energía mínima que necesita un sistema antes de iniciar la reacción. Puesto que la tercera reacción, de subproductos, tiene una energía de activación tan baja se asume que el valor de k_3 es constante e independiente de la temperatura; para las dos reacciones principales los parámetros de la ecuación de Arrhenius se recogen en la tabla 10:

Tabla 10: Dependencia de las constantes cinéticas con la temperatura según Arrhenius

Reacción	Factor preexponencial	E_a (kJ/kmol)
1	$1.114 \cdot 10^{18}$ kmol/kg h bar	151670
2	47566 kmol/kg h	54182.8

2.5 Cálculos previos al diseño del reactor R-201

En este apartado se justificará la configuración del reactor utilizado y se introducirá de manera rigurosa la metodología empleada para estipular la masa de catalizador necesaria para llevar a cabo la operación.

Los reactores catalíticos heterogéneos para operar a escala industrial se pueden dividir en dos grandes grupos: reactores de lecho fijo (o lecho empacado) y reactores de lecho fluidizado. Así como estos últimos tienen aplicaciones muy específicas, son difíciles de controlar y tienen una modelización matemática del régimen de flujo complicada lo cual dificulta la labor de diseño, el reactor de lecho empacado es la configuración de uso más frecuente debido a su simplicidad y bajos costes de construcción, operación y mantenimiento.

Debido a sus características inherentes, este tipo de reactores son muy flexibles en relación a posibles condiciones cambiantes de la alimentación y distintos tiempos de residencia; además, el régimen de flujo es muy fácil de modelizar puesto que se aproxima al de flujo en pistón (cuando la relación entre la longitud del reactor y el diámetro de los tubos es mayor a 12), favoreciendo un contacto eficiente entre la mezcla reaccionante y el lecho empacado.

Las principales desventajas asociadas a los PBR (*Packed Bed Reactors*) están vinculadas a operaciones altamente exotérmicas donde se pueden desarrollar puntos calientes irregulares en el seno de los gránulos de catalizador dificultando un control efectivo de la temperatura, a grandes caídas de presión si se emplean *pellets* muy pequeños y a operaciones en las que el catalizador se tenga que regenerar frecuentemente por cuestiones de desactivación, convirtiendo la operación global en inviable desde un punto de vista económico. Como se verá en apartados posteriores, al tratarse de un reactor donde tiene lugar una operación endotérmica, con una caída de presión baja por tubos y con una gran estabilidad del catalizador a desactivación, es altamente recomendable optar por llevar a cabo el sistema reactivo en un reactor de lecho empacado.

2.5.1 Modelado unidimensional de las ecuaciones de diseño

Los modelos unidimensionales suponen que las concentraciones, flujos molares y la temperatura solo presentan perfiles axiales. Un reactor de lecho fijo es un medio heterogéneo y su volumen interior está lleno de gránulos de catalizador, mas una fracción considerable de este espacio interior está *vacío*. La mezcla reaccionante tiene que encontrar su camino a través del lecho circulando entre los gránulos de catalizador por estos espacios vacíos.

No obstante, al modelar este tipo de reactores es habitual suponer que el catalizador se encuentra distribuido de manera uniforme y que la velocidad lineal es la misma para una posición axial dada, es decir, un perfil plano de velocidad (característico del flujo en pistón). Únicamente para los efectos de transferencia de calor se puede suponer que

existe una capa límite en la pared, pero la temperatura se mantiene constante en la superficie de cada capa (pistón) de fluido. Además, no se consideran perfiles radiales de concentración dado que se supone que todos los elementos de volumen dentro de un pistón tienen el mismo tiempo de residencia, por tener la misma velocidad lineal.

Cuando se presenten varias reacciones simultáneas, lo más coherente es desarrollar los balances de materia (ecuaciones de diseño) en su forma diferencial, trabajando con los flujos molares (las sustancias reaccionan mol a mol) como variables dependientes y con la masa de catalizador (puesto que es la base de cálculo de las leyes de velocidad desarrolladas) como variable independiente.

La expresión de base para los Principios de Conservación, presentada en el Anexo I. Balances de materia y energía (Salida-Entrada+Generación=Acumulación), se reescribe en forma diferencial para reflejar los balances de materia -teniendo en cuenta las relaciones estequiométricas- a cada uno de los componentes que constituyen la mezcla reaccionante:

$$\frac{dF_E}{dW} = -r'_1 - r'_2 \quad (42)$$

$$\frac{dF_A}{dW} = r'_1 - r'_2 - 2 \cdot r'_3 \quad (43)$$

$$\frac{dF_{EA}}{dW} = r'_2 \quad (44)$$

$$\frac{dF_{H2}}{dW} = r'_1 + r'_2 \quad (45)$$

$$\frac{dF_O}{dW} = r'_3 \quad (46)$$

donde el subíndice o hace referencia a otros subproductos, agrupados como acetaldol.

Sin embargo, las leyes de velocidad dependen de la concentración de los compuestos en cada instante de reacción (al trabajar en fase gas la analogía se realiza con presiones parciales). Por ello, para poder resolver el sistema de ecuaciones se requiere de una relación entre presiones parciales y flujos molares con el fin de conseguir un sistema de ecuaciones determinado (tantas ecuaciones diferenciales como incógnitas), que se presenta a continuación:

$$P_i = \frac{F_i}{F_T} \cdot P_T \quad (47)$$

$$F_T = \sum_{i=1}^5 F_i \quad (48)$$

en donde P_T es la presión de operación del reactor, constante a 20 bar (realmente hay una pequeña pérdida de carga como se calculará más tarde, pero a efectos prácticos es más sencillo asumir el ecosistema reactivo como isobárico).

En adición a los balances de materia, puesto que la reacción global es moderadamente endotérmica, la operación no se llevará a cabo en régimen isotérmico por lo que habrá que plantear el balance de energía al reactor para tener en cuenta los cambios de temperatura debido al desarrollo de la propia reacción.

2.5.2 Balances de energía al reactor de lecho fijo

Los reactores tubulares no-isotérmicos en estado estacionario son muy comunes a nivel industrial. La operación se puede desarrollar de manera adiabática, con un medio de calentamiento a temperatura constante (lo cual se puede suponer cuando existe un fluido térmico con buena conductividad térmica, como un aceite de alto peso molecular, o cuando el flujo del aceite térmico es suficientemente alto con respecto al calor absorbido por la mezcla de reacción) o con intercambio de calor con otro fluido en operación paralela, contracorriente o de flujo cruzado. Para cualquiera de los casos anteriores, debido al calor de reacción existirá un perfil radial de temperatura, que afecta principalmente a:

- La velocidad de reacción, pues la constante cinética depende exclusivamente de la temperatura (también de la presión, pero en mucha menor medida) en forma exponencial según un arreglo de Arrhenius (ecuación 41): k_i siempre aumenta al incrementar T .
- La constante de equilibrio químico, que aumenta si la reacción es endotérmica; si una reacción se acerca al equilibrio, la velocidad de reacción tenderá a 0 aumentando el volumen del reactor. El equilibrio químico también puede tener un efecto negativo sobre la selectividad si la reacción principal tiene limitaciones de carácter termodinámico y las no deseadas no tienen restricciones de este tipo.

Un concepto clave a tener en cuenta a la hora de considerar los efectos térmicos en un reactor químico es que sin importar el número de reacciones que tengan lugar en su interior, ni el tipo de reactor ni su modo de operación, únicamente existe un balance de energía independiente para la mezcla reaccionante. Para aclarar este punto conviene pensar que ésta no es más que una unidad de volumen (un pistón para un reactor del tipo tubular) que conforme se intercambia calor con los alrededores y se libera/consume energía por las reacciones, cambia de temperatura de manera uniforme ya que su estado térmico es único y se va a ver afectada por los calores de reacción de todas las reacciones independientes.

La obtención de las expresiones para los balances de energía parte, como se ha indicado en el Anexo I. Balances de materia y energía, de la Primera Ley de la Termodinámica. Los reactores de flujo continuo son sistemas abiertos porque la masa atraviesa los límites del volumen del sistema de control, como se ilustra en la figura 6.

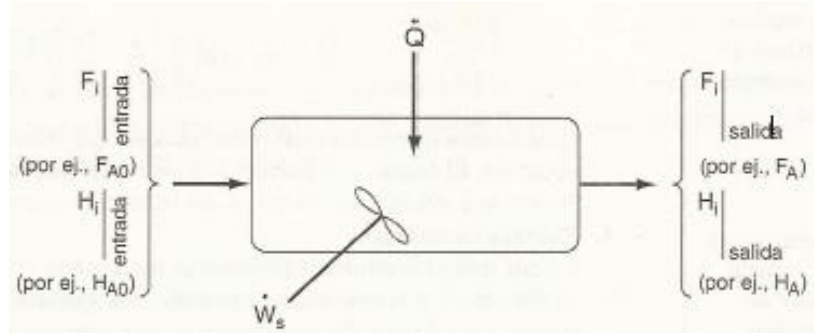


Figura 6: Esquema simplificado del balance de energía para un sistema abierto (Fogler)

Se realiza la suposición de que el contenido del volumen del sistema está bien mezclado, llegando a que el balance de energía en estado no estacionario para un sistema abierto que tiene n especies, cada una entrando y saliendo del sistema con su flujo molar respectivo F_i y con su energía respectiva E_i (J/mol) es:

$$\frac{d\widehat{E}_{sys}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum F_{i,ent} E_{i,ent} - \sum F_{i,sal} E_{i,sal} \quad (49)$$

que no es más que una representación de la expresión de conservación de la energía.

La ecuación 49 es el punto de partida, sobre la cual se desarrollarán las ecuaciones que permitan tener en cuenta los efectos térmicos en el reactor catalítico heterogéneo R-201. Primeramente, se extiende el término de trabajo en sus dos entes fundamentales: \dot{W}_s , también conocido como trabajo de eje, que es el producido por una turbina en un reactor de flujo en pistón y \dot{W} , flujo de trabajo, que es el trabajo necesario para hacer que la masa entre y salga del sistema. En ausencia de agitadores externos, se escribe la relación:

$$\dot{W} = - \sum F_{i,ent} P_{ent} \widetilde{V}_{i,ent} + \sum F_{i,sal} P_{sal} \widetilde{V}_{i,sal} \quad (50)$$

donde P es la presión (Pa: kg/m s²) y \widetilde{V} es el volumen molar específico de la especie i (m³/mol de i). Por tanto, vemos que las unidades de trabajo son $\dot{W} = \text{J/s} = \text{kg m}^2/\text{s}^3$, congruentes con los otros términos de la ecuación 49. Además, los signos de la expresión anterior no violan el convenio de signos escogido: el flujo de trabajo es realizado por el sistema (reactor químico) sobre los alrededores.

El término flujo de trabajo se combina con los términos de balance de energía que representan intercambio de energía por flujo de masa a través de los límites del sistema. Considerando que no hay pérdida de carga a lo largo del sistema y agrupando términos, la expresión resulta en:

$$\frac{d\widehat{E}_{sys}}{dt} = \dot{Q} + \sum F_i \cdot (E_i + P V_i)_{ent} - \sum F_i \cdot (E_i + P V_i)_{sal} \quad (51)$$

La energía E_i es la suma de la energía interna (U_i), energía cinética ($u_i^2/2$), energía potencial gravitacional ($g \cdot z_i$) y cualquier otra forma de energía (bien sea eléctrica, magnética, luminosa...). Aplicado al caso de los reactores químicos, los términos de

energía cinética, potencial y *otras formas* son despreciables en comparación con los términos de entalpía, transferencia de calor y trabajo, por tanto se omiten, de tal manera que la energía del sistema es igual a su energía interna, que se relaciona con el concepto de entalpía de la manera presentada en la ecuación 52:

$$E_i = H_i = U_i + P\tilde{V}_i \quad (52)$$

Combinando las dos expresiones anteriores y teniendo en cuenta que en estado estacionario el término de acumulación es nulo, se presenta la siguiente relación, que será el punto de partida del balance de energía implícito al reactor tubular R-201:

$$\dot{Q} + \sum F_{i,ent} H_{i,ent} - \sum F_{i,sal} H_{i,sal} = 0 \quad (53)$$

Para aplicar esta expresión del balance de energía a un reactor tubular se empleará cálculo diferencial, ya que en cada elemento de volumen presenta un comportamiento diferente. El esquema de base para considerar los elementos diferenciales de volumen se muestra en la figura 7.

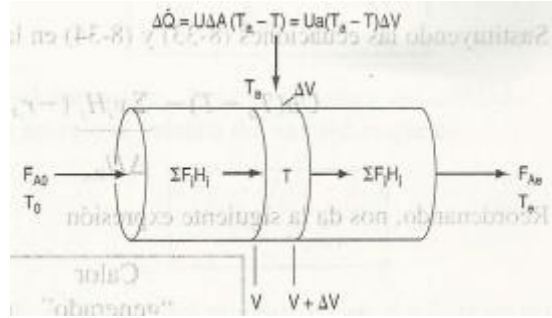


Figura 7: Reactor tubular no-adiabático (Fogler)

Así que bajo la suposición de que no hay gradientes radiales de temperatura (modelo unidimensional), la ecuación 53 se transforma en la siguiente expresión aplicando el balance de energía para el elemento ΔV :

$$\Delta\dot{Q} + \sum (F_i H_i)_V - \sum (F_i H_i)_{V+\Delta V} = 0 \quad (54)$$

en donde el flujo de calor al reactor se proporciona en términos del coeficiente integral de transmisión de calor (U), el área de intercambio de calor (ΔA) y la diferencia entre la temperatura ambiente, T_a y la temperatura de la mezcla reaccionante en el interior del reactor, T , según la ecuación 55:

$$\Delta\dot{Q} = U \cdot \Delta A \cdot (T_a - T) = U \cdot a \cdot \Delta V \cdot (T_a - T) \quad (55)$$

en la cual a es el área de intercambio de calor por unidad de volumen del reactor, siendo definida del siguiente modo:

$$a = \frac{A}{V} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L} = \frac{4}{D} \quad (56)$$

Sustituyendo la ecuación 55 en la ecuación 54, dividiéndola por ΔV y en el límite, cuando ΔV tiende a cero, se obtiene lo siguiente:

$$U \cdot a \cdot (T_a - T) - \sum \frac{dF_i}{dV} \cdot H_i - \sum F_i \cdot \frac{dH_i}{dV} = 0 \quad (57)$$

Efectuando un balance molar para cada una de las especies i en el que se tiene en cuenta las estequiometrías que rigen las reacciones químicas (tal y como se explicitaron los balances de materia en las ecuaciones 42-46) y por lo tanto el cambio en la composición en cada punto del reactor:

$$\frac{dF_i}{dV} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} r'_j \quad (58)$$

en donde el subíndice i hace referencia a las n especies que participan en las m reacciones químicas, denotadas con el subíndice j . De la misma manera, se diferencia la entalpía con respecto al volumen:

$$\frac{dH_i}{dV} = C_{p,i} \cdot \frac{dT}{dV} \quad (59)$$

Sustituyendo, reordenando términos y teniendo en cuenta que en un reactor de lecho fijo se define $dW = \rho_B \cdot dV$, donde ρ_B es la densidad del lecho catalítico, se obtiene la expresión que se utilizará como balance de energía para estudiar los efectos términos en la operación del reactor R-201:

$$\frac{dT}{dW} = \frac{\frac{U \cdot a \cdot (T_a - T)}{\rho_B} - \sum_{j=1}^m \Delta H_{Rj} \cdot r'_j}{\sum_{i=1}^n F_i \cdot \bar{C}_p} \quad (60)$$

siendo ρ_B la densidad del lecho catalítico (950 kg/m^3) y en donde el primer término del numerador hace referencia al calor proporcionado por un fluido calefactor en el caso de que se pretenda mantener la temperatura de operación en el régimen óptimo para compensar la endotermicidad de las reacciones que ocurren en el interior del reactor, contempladas en el segundo término del numerador. De lo expuesto en estas líneas se extrae que si se operase en régimen adiabático el primer término sería 0, puesto que el coeficiente integral de transmisión de calor sería nulo y se supone que el reactor tiene pérdidas de calor despreciables hacia el exterior debido al uso de una capa de aislante en la carcasa del mismo.

Es importante tener presente en la ecuación del balance de energía que las entalpías de reacción están asociadas a la temperatura a la que se realiza la reacción y por lo tanto no se calculan como en el caso de los calores de reacción estándar (ecuación 33), necesitando una expresión de esta entalpía de reacción en función de la temperatura a la que ocurra la reacción. Con este propósito, se emplea la figura 8.

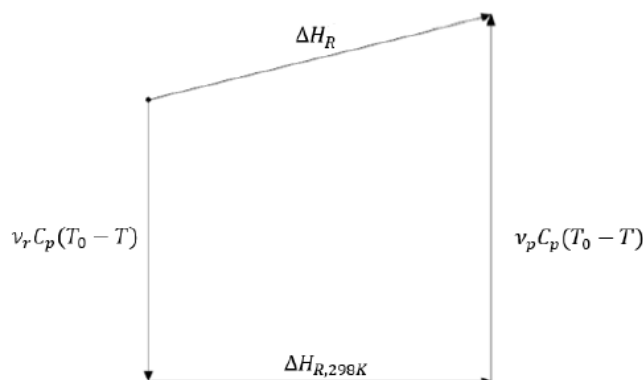


Figura 8: Metodología para el cálculo de calores de reacción en función de la temperatura (Smith-Van Ness)

Teniendo en cuenta que la entalpía es una función de estado, los calores de reacción se pueden calcular a cualquier temperatura considerando en la medida adecuada el calor intercambiado por reactivos y productos hasta la temperatura de referencia. La energía intercambiada por un compuesto durante un cambio de temperatura (diferenciación de la ecuación 59) es:

$$dH = C_p dT \quad (61)$$

En el caso de que el lector guste de la deducción de esta expresión, se le emplaza al capítulo 4. *Efectos caloríficos* de la magnífica obra de termodinámica aplicada a la ingeniería química editada por Smith & Van Ness. La relación empírica entre calor específico y temperatura, para especies en estado de gas ideal, es la siguiente:

$$\frac{C_p}{R} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + \frac{D}{T^2} \quad (62)$$

en la cual el término de la izquierda es adimensional, por lo que las unidades del calor específico van a depender de la elección que se haga en lo tocante a la constante de los gases. Los valores de las constantes empíricas están tabulados en la tabla 11:

Tabla 11: Parámetros empíricos para el cálculo del calor específico en fase gas (Smith-Van Ness)

Especie	A	B·10 ³	C·10 ⁶	D·10 ⁻⁵
Etanol	3.518	20.001	-6.002	-
Acetaldehído	1.693	17.978	-6.158	-
Hidrógeno	3.249	0.422	-	0.083

Para las constantes del acetato de etilo es necesario acudir a otra fuente bibliográfica; en este caso, la relación C_p - T que se presenta es la siguiente, siendo las unidades de calor específico J/kmol K:

$$C_p = C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{C_3/T}{\sinh(C_3/T)} \right)^2 + C_4 \cdot \left(\frac{C_5/T}{\cosh(C_5/T)} \right)^2 \quad (63)$$

cuyos parámetros se enseñan en la tabla 12:

Tabla 12: Parámetros empíricos para la determinación del C_p del acetato de etilo (Perry)

Especie	$C_1 \cdot 10^{-5}$	$C_2 \cdot 10^{-5}$	$C_3 \cdot 10^{-3}$	$C_4 \cdot 10^{-5}$	C_5
Acetato de etilo	0.9981	2.0931	2.0226	1.8030	928.05

Ambas relaciones del calor específico con la temperatura están concebidas para ser utilizadas con temperatura absoluta (K).

Por lo tanto, el calor intercambiado se obtiene resolviendo la siguiente integral, en la que se incluyen las relaciones empíricas entre calor específico y temperatura:

$$\Delta H = \int_{T_{REF}}^{T_{ÓPTIMA}} C_p dT \quad (64)$$

siendo la temperatura de referencia 298.15 K (25°C) y la temperatura óptima de operación en el reactor 493.15K (220°C). Finalmente, el calor de reacción a una temperatura T (en este caso $T_{ÓPTIMA}$) se estipula aplicando todo lo comentado hasta el momento:

$$\Delta H_{Rj}(T) = \Delta H_{Rj,0}(298.15 \text{ K}) + \sum_{i=1}^n v_i \cdot \int_{298.15}^{493.15} C_p dT \quad (65)$$

Los valores obtenidos, que se utilizan de manera directa en la expresión del balance de energía -representado por la ecuación 60- se recogen en la tabla 13:

Tabla 13: Efectos térmicos en el reactor R-201 debidos a las propias reacciones

Reacción	ΔH_R^0 (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔH_R (kJ/mol)
1	68.71	1.34	70.05
2	-43.31	2.59	-40.72

2.5.3 Resolución simultánea de ecuaciones de diseño y balances de energía

Pese a tratarse de una ruta de reacción novedosa, uno se ha de apoyar en la literatura de la que disponga para inicializar los cálculos. En este caso se acude al *documento germen* de la primera planta de producción industrial de acetato de etilo mediante deshidrogenación de etanol: la tesis doctoral llevada a cabo por W. Colley. En ella se relata que el reactor de deshidrogenación catalítica opera en un régimen adiabático con calefacción intermedia entre lechos para compensar los efectos endotérmicos de la reacción global.

Por ello, se propone esta opción como primer intento. Bajo un régimen de operación adiabática, el balance de energía al reactor (ecuación 60) adoptaría la siguiente forma:

$$\frac{dT}{dW} = \frac{-\sum_{j=1}^m \Delta H_{Rj} \cdot r_j'}{\sum_{i=1}^n F_i \cdot \bar{C}_p} \quad (66)$$

de tal manera que el sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales no lineal constaría de 6 ecuaciones diferenciales que reflejan las 6 variables dependientes (los flujos molares de las cinco especies que intervienen en la mezcla reaccionante más la

temperatura del fluido de operación) y la variable independiente, que tal y como están definidas las leyes de velocidad, será la masa de catalizador. Con el propósito de relacionar los datos disponibles con el modelo cinético se dispone asimismo de 6 ecuaciones algebraicas, 5 de ellas destinadas a enlazar los flujos molares de cada componente con su presión parcial correspondiente y una dirigida hacia el cálculo del flujo total, que será la suma de los flujos molares de cada componente.

Se trata de un sistema determinado (número de ecuaciones = número de incógnitas) que no tiene solución analítica, por lo que se acometerá su resolución de forma numérica aproximada empleando métodos de Runge-Kutta (adaptación mejorada del Método de Euler basado en la discretización de puntos para la resolución de ecuaciones diferenciales); en este caso se utiliza un método que combina aproximaciones de cuarto y quinto orden, basando los cálculos en el algoritmo de Dormand y Prince.

Los resultados obtenidos, suponiendo un régimen de operación adiabático, proporcionan información muy valiosa. Como muestra de ello, véase el perfil de temperaturas del fluido de operación a medida que avanza por el lecho catalítico presentado en la figura 9:

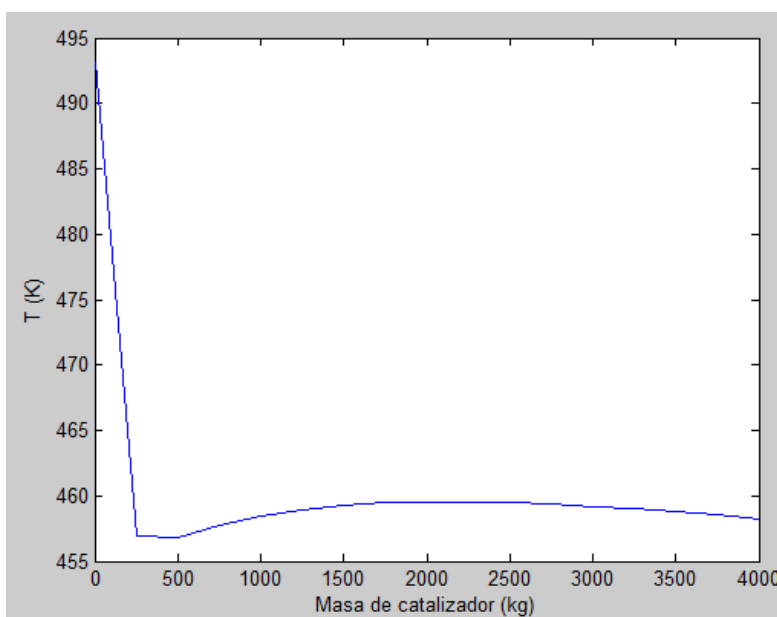


Figura 9: Perfil de temperaturas de la mezcla reaccionante en operación adiabática

Lo mostrado en la figura 9 no supone una gran sorpresa teniendo en cuenta el carácter endotérmico de la reacción global; si se profundiza un poco más, la deshidrogenación de etanol a acetaldehído (1ª reacción) es altamente endotérmica, de ahí que la temperatura de la mezcla reaccionante baje de manera brusca al entrar en el lecho catalítico. Una vez comienza a interactuar el etanol con el acetaldehído para dar acetato de etilo (2ª reacción) la temperatura aumenta de manera ligera -ya que es una reacción exotérmica- mas no tiene inercia para compensar el moderado carácter endotérmico que caracteriza a la reacción global.

El principal inconveniente de este descenso de temperatura tan brusco al comienzo del lecho catalítico es que la mezcla reaccionante entra en un rango de temperaturas de operación en el cual la actividad del catalizador (que se traduce en la conversión del etanol que se alimenta como reactivo) es muy baja, estando en consonancia con el estudio termodinámico presentado en la Memoria. Esta actividad escasa provoca una producción de acetato de etilo muy baja, lo que implicaría la utilización de grandes cantidades de entramado catalítico para viabilizar la operación desde un punto de vista económico.

Por lo tanto, desde el punto de vista operacional, resulta obvio apuntillar que un sistema adiabático no es la mejor estrategia para acometer la producción de acetato de etilo, aun incluyendo calefacción intermedia, ya que justo en el momento en que la mezcla reaccionante comienza a interactuar con el lecho catalítico se produce un descenso notable (aproximadamente 35°C) de la temperatura, causando que el catalizador se encuentre alejado del régimen óptimo de operación.

Por este motivo, se propone una operación del reactor R-201 en un régimen en el que exista intercambio de calor con un fluido calefactor (aceite térmico Dowtherm Q, suministrado por la casa DOW Chemical). Con el fin de optimizar la transmisión de calor se adopta una solución de uso muy frecuente a nivel industrial: distribuir los gránulos de catalizador en tubos de pequeño diámetro con el fin de aumentar la superficie de transferencia de calor y hacer fluir el aceite térmico por una carcasa, de tal manera que el reactor adopte una morfología similar a la de un intercambiador de calor de carcasa y tubos convencional.

En este caso, como el área de transmisión de calor viene limitada por la masa de catalizador que se necesite para cumplimentar los requerimientos de la planta (la producción de acetato de etilo ha de igualar la capacidad de diseño del proceso) y no existe un descenso brusco de temperaturas en la mezcla reaccionante (inferior a 40°C como se puede constatar en la figura 9), se opta por un flujo paralelo del aceite térmico con respecto al fluido de operación. El balance de energía al aceite térmico responde a la siguiente expresión:

$$\frac{dT_a}{dW} = - \frac{a \cdot U \cdot (T_a - T)}{F_a \cdot C_{p,a}} \quad (67)$$

en donde el subíndice a hace referencia al aceite térmico. El signo negativo se incluye para tener en cuenta el significado físico de la transmisión de calor: el numerador de la ecuación anterior será positivo si la temperatura del fluido térmico es mayor que la temperatura de la mezcla de reacción, pero si se cumple este caso el signo global de este térmico tiene que ser negativo puesto que el calor se transmite desde la carcasa hacia el interior de los tubos; otra forma de verlo es que si $T_a > T$ entonces el lado derecho de la igualdad será negativo porque el resto de términos son positivos, por lo que a medida

que aumenta la masa de catalizador (o lo que es lo mismo, a medida que avanza el fluido de operación) la temperatura del fluido de servicio descenderá.

Además, desde el enfoque de modelización matemática el caso en paralelo es el más sencillo porque todas las condiciones de frontera son valores iniciales tanto para las ecuaciones de diseño como para los dos balances de energía independientes. Tanto el lado de tubos (fluido de operación) como el lado de carcasa (fluido de servicio) tienen sus condiciones iniciales en la misma frontera, $W=0$, con lo que el sistema de ecuaciones diferenciales simplemente se integra por Runge-Kutta.

Por la contra, la operación a contracorriente implica especificaciones en dos fronteras, lo que conlleva en el uso de un método de disparo: en $W=0$ para las ecuaciones de diseño y el balance de energía a la mezcla de reacción, esto es, los flujos molares de cada componente y la temperatura de la entrada al reactor, y en $W=W_{cat}$ la especificación de la temperatura de entrada del aceite térmico. La estrategia de resolución recomendada sugiere un procedimiento de prueba y error: suponer T_a en $W=0$, integrar todas las ecuaciones diferenciales con el método de Runge-Kutta como si se tratase de una integración con valores iniciales, comparar T_{a0} calculada con la especificada e iterar hasta lograr convergencia.

Una vez defendida la opción del flujo en paralelo, se procede a especificar los parámetros asociados al balance de energía al fluido térmico (ecuación 67). El parámetro geométrico viene especificado por la relación entre el área y el volumen de intercambio de calor ($a=4/D$); se ha acudido a una tabla de tamaños estandarizados de conducciones y se ha escogido una configuración altamente frecuente en la industria, mostrada en la tabla 14.

Tabla 14: Dimensiones estandarizadas de la conducción seleccionada

DN (mm)	Cédula	d_i (mm)	Espesor (mm)	d_o (mm)
80	40	77.9	5.5	88.9

donde d_i hace referencia al diámetro interno de los tubos y d_o al diámetro externo, cuyo valor depende lógicamente de la cédula (habitualmente expresada como Sch de *schedule*)

Los parámetros de transmisión de calor están vinculados al coeficiente integral, U , que se define como la inversa de la resistencia global a la transferencia de calor, la cual es la suma de todas las resistencias asociadas a un determinado sistema (en alusión a la analogía termoeléctrica con la Ley de Ohm). La expresión viene dada por:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + d_o \cdot \frac{\ln(d_o/d_i)}{2 \cdot k_{tubos}} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_f} \quad (68)$$

donde se incluyen las resistencias típicas en un intercambiador de calor de carcasa y tubos: el coeficiente de convección del lado de carcasa, h_o , la resistencia a la conducción

teniendo en cuenta la conductividad térmica del material de los tubos, el coeficiente de convección del fluido de lado de tubos y el factor de ensuciamiento, h_f , importante cuando se utilizan fluidos viscosos con cierta tendencia a ensuciar la superficies de transmisión de calor, formando una costra que lógicamente supone una resistencia extra a la transferencia. En este caso, los factores de ensuciamiento se desprecian al ser fluidos relativamente limpios.

No obstante, con el fin de tener una estimación rápida del coeficiente integral de transmisión de calor sin analizar las tediosas correlaciones empíricas para los coeficientes de convección, es común acudir a nomogramas gráficos, como el introducido en la figura 19 que recogen de una manera más tosca los valores habituales. En este caso, considerando que el fluido de proceso (interior de los tubos) es *boiling organics* y que el fluido de servicio (carcasa) es *hot heat transfer oil*, la U inferida es $650 \text{ W/m}^2 \text{ K} = 2340 \text{ kJ/h m}^2 \text{ K}$.

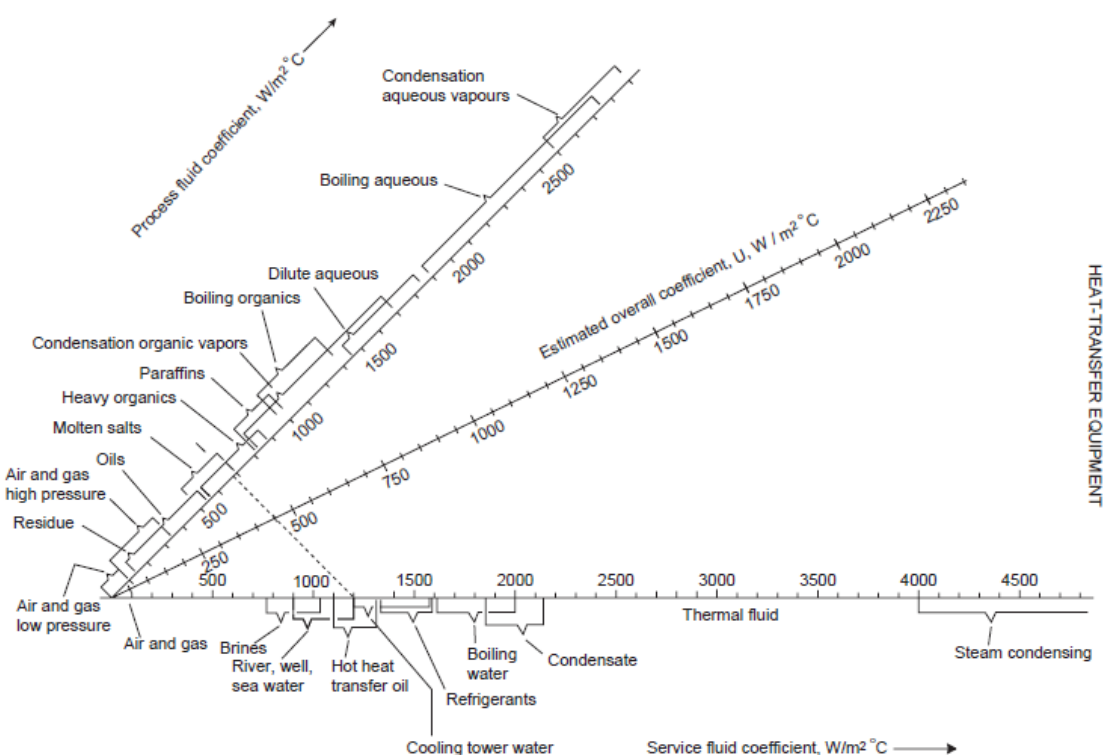


Figura 10: Nomograma de Frank para la obtención de coeficientes integrales de transmisión de calor (Sinnott)

En lo relativo al flujo de aceite térmico, se realizan tanteos para comprobar cuál puede ser un valor óptimo. Teniendo en cuenta que por tubos circulan aproximadamente 10500 kg/h de mezcla reaccionante, una primera estimación acertada resulta en considerar un flujo de 15000 kg/h de aceite térmico por la carcasa; no obstante, habrá que calcular la caída de presión asociada para comprobar si es un valor aceptable o no. Finalmente, la ficha técnica de DOW Chemical incluye gráficas que informan acerca de la relación del calor específico del aceite con la temperatura absoluta:

$$C_{p,a} = 0.003 \cdot T_a + 0.78055 \quad (69)$$

Para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales formado por las 5 ecuaciones de diseño (balances de materia) y los 2 balances de energía independientes es necesario disponer de las condiciones de frontera iniciales; se requiere por ello el flujo de entrada de los diferentes componentes, la temperatura inicial de los reactivos y la temperatura de entrada de fluido térmico a la carcasa del reactor R-201. Los códigos implementados en Matlab® para la resolución numérica del problema se presentan en el *Anexo III. Códigos implementados en Matlab* de esta Memoria.

Tal y como están configurados los métodos de Runge-Kutta en el software utilizado, la resolución es aportada como una matriz de datos que contiene en las columnas los valores de cada una de las variables dependientes (flujos y temperaturas) con respecto a la variable independiente (masa de catalizador). Este conjunto de datos se presenta en la figura 11 de manera gráfica.

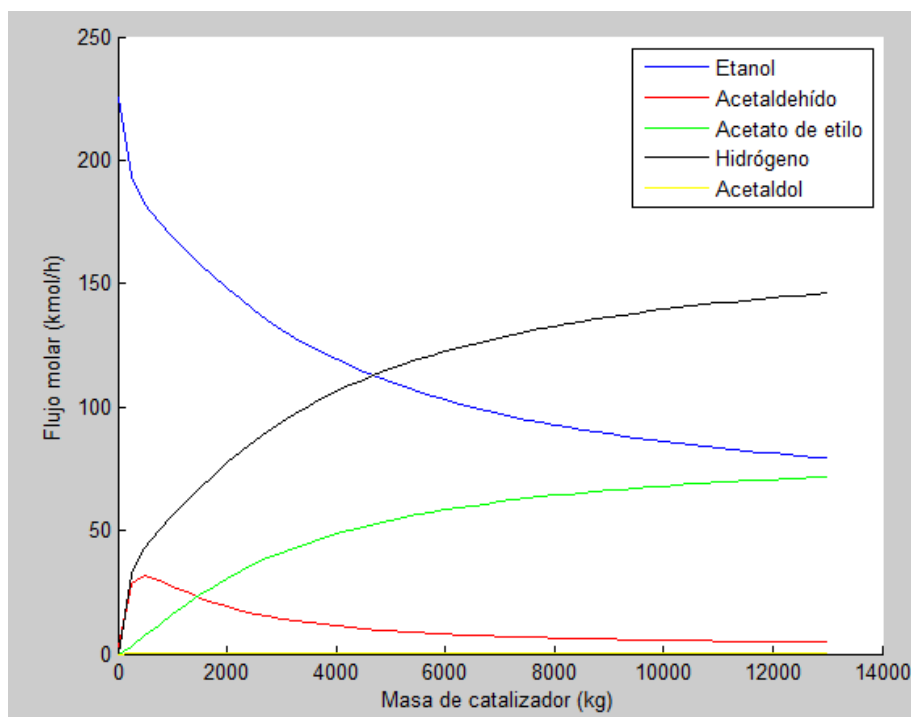


Figura 11: Perfil de composiciones a lo largo del reactor R-201

Para estimar el rango de valores de masa de catalizador necesario, se acude a la bibliografía para consultar el dato de tiempo de residencia de etanol en los experimentos llevados a cabo a lo largo del estudio cinético. El criterio utilizado en estos cálculos previos a diseño es de buscar la operación lo más isotérmica posible entorno a la temperatura óptima de reacción con el fin de conseguir los mejores valores de conversión de etanol y selectividad en acetato de etilo: por lo tanto, se tantea el valor de masa de catalizador y el de temperatura de entrada del aceite térmico para conseguir

estos propósitos, teniendo en cuenta que la producción horaria de acetato de etilo ha de satisfacer los requerimientos de capacidad de diseño.

Bajo esta consideración de diseño, se comprueba que los valores de conversión y selectividad obtenidos son los proporcionados por la bibliografía. Para su estudio más pormenorizado, se grafican ambos parámetros empleando las ecuaciones 20 y 36 respectivamente en la figura 12.

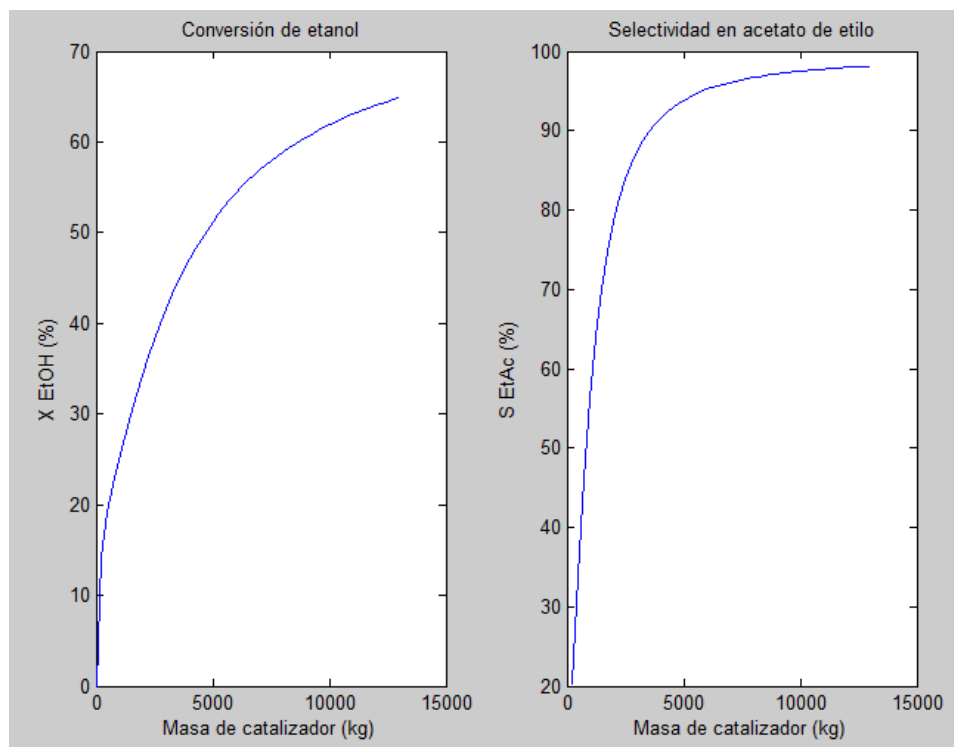


Figura 12: Perfiles de conversión y selectividad a lo largo del reactor R-201

Teniendo todas las consideraciones introducidas hasta el momento en cuenta, se llega a la conclusión de que se necesitan 13000 kg de catalizador puesto que los resultados proporcionados son los exhibidos en la tabla 15.

Tabla 15: Comprobación del criterio empleado para el diseño de R-201

Capacidad de producción (t/año)	X_E (%)	S_{EA} (%)
50045	64.83	98.14

Se puede observar que los resultados obtenidos a gran escala para el R-201 coinciden con los proporcionados por el estudio cinético del sistema reactivo (conversión cercana al 65% y selectividad en acetato de etilo superior al 98%), satisfaciendo asimismo la capacidad de producción de diseño en la planta y trabajando en un rango de temperaturas óptimo desde un punto de vista termodinámico (220-225°C). El comportamiento en temperaturas en cada punto del reactor se puede observar en la figura 13, donde se muestra el equilibrio térmico alcanzado entre ambos fluidos.

En conclusión, la modelización matemática (balances de materia y de energía en forma diferencial) del reactor catalítico heterogéneo R-201 consiste en un sistema de

ecuaciones diferenciales no lineales cuya resolución numérica, para una masa de catalizador $W=13000$ kg, proporciona unos datos de conversión y selectividad acordes con los presentados en el estudio cinético y un rango de operación en un abanico de temperaturas óptimo según el estudio termodinámico, además de satisfacer los requerimientos de producción anual de acetato de etilo proporcionados por la capacidad de diseño.

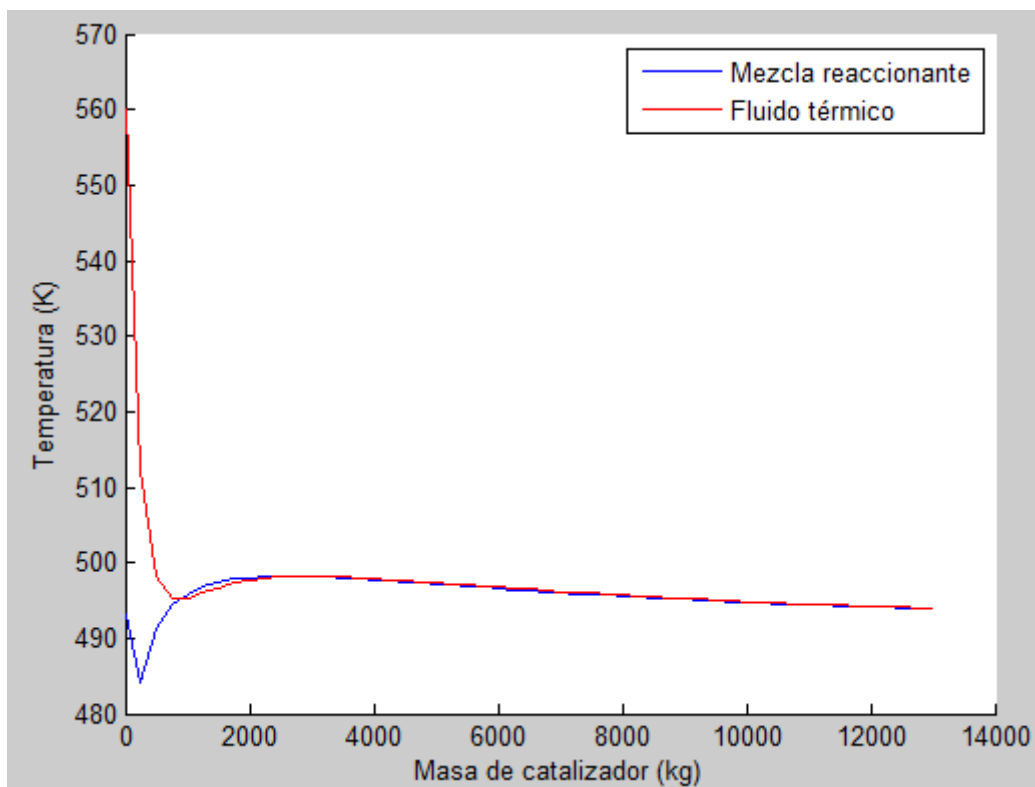


Figura 13: Perfil de temperaturas para ambos fluidos en su operación en el R-201

2.6 Diseño del reactor R-201

Una vez conocida la masa de catalizador, que determina el área de intercambio de calor necesaria, se lleva a cabo el diseño del reactor catalítico heterogéneo en tanto a la determinación del número de tubos necesarios para llevar a cabo la operación y el diámetro de la carcasa que envuelve al haz de tubos, a través de la cual circula el aceite térmico. Atendiendo a la morfología de intercambiador de calor de carcasa y tubos, se seguirán las normas correspondientes a este tipo de equipamiento.

2.6.1 Determinación del número de tubos

Para dimensionar un reactor de lecho empacado, el volumen del lecho de catalizador se calcula dividiendo la masa de catalizador por la densidad del lecho catalítico. El volumen calculado atiende a todos los gránulos de catalizador incluidos los espacios vacíos entre ellos:

$$V_{cat} = \frac{W}{\rho_B} \quad (70)$$

El criterio de diseño empleado en este caso atiende a la longitud de los tubos, ya que la construcción de las conducciones se suele realizar, como ya se sabe, de manera estandarizada. Para tubos largos, la longitud estándar recibe el nombre de DRL (*Double Random Length*) con una longitud oscilante entre 38-40 ft (12 m). Teniendo en cuenta el volumen ocupado por una sección cilíndrica:

$$V_{cat} = \pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot L \cdot N \quad (71)$$

se puede calcular la única incógnita, N, el número de tubos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 16.

Tabla 16: Cálculos necesarios para determinar el número de tubos

Parámetro	Valor
W (kg)	13000
ρ_B (kg/m ³)	950
V_{cat} (m ³)	13.68
d_i (m)	0.0779
L (m)	12
N	240

Una vez conocido el número de tubos necesarios para llevar a cabo la operación se puede inferir la velocidad de la mezcla reaccionante gaseosa a través del lecho catalítico, para comprobar si el criterio de diseño empleado es válido o no:

$$u_{lecho} = \frac{Q_{mezcla}}{Sección} = \frac{F_{mezcla} / \rho_{media}}{\pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot N} \quad (72)$$

donde la densidad media del fluido de reacción se calcula como la media aritmética de la densidad del fluido de entrada y del de salida (a las condiciones de reacción: 220°C y 20 bar), calculadas a partir de la densidad molar empleando la Ley de los Gases Ideales:

$$\rho_m = \frac{1}{V_m} = \frac{P}{R \cdot T} \quad (73)$$

Por el Principio de Conservación de la Materia, el flujo másico de mezcla reaccionante se mantiene constante en cada punto del reactor, pudiendo comprobar su valor en el Anexo I de la Memoria. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 17.

Tabla 17: Cálculo de la velocidad de la mezcla reaccionante a través del lecho catalítico multitubular

Parámetro	Valor
Flujo másico (kg/h)	10527.51
ρ_{entrada} (kg/m ³)	22.46
ρ_{salida} (kg/m ³)	17.04
u_{lecho} (m/s)	0.13

El valor obtenido es acorde con lo propuesto por la bibliografía, por lo que se concluye que el criterio utilizado para determinar el número de tubos es válido y coherente.

2.6.2 Caída de presión de la mezcla reaccionante a través del lecho

El cálculo de la velocidad del fluido de reacción en su trasiego a través de las conducciones no es el único cómputo que se realiza para validar el número de tubos obtenidos. Para confirmar el dato conviene calcular la pérdida de carga del fluido en su flujo a través del lecho empacado, para lo cual se emplea la Ecuación de Ergun (ecuación 74) ya que el régimen de flujo obtenido mediante el módulo de Reynolds es ligeramente turbulento (el número adimensional asume un valor aproximado de 6000):

$$\Delta P_{\text{tubos}} = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu_m \cdot u_{\text{lecho}}}{\varepsilon^3 \cdot \Phi_s^2 \cdot D_p^2} + 1.75 \quad (74)$$

en la cual es necesario determinar la esfericidad de los *pellets* de catalizador y la viscosidad media de la mezcla de gases que conforma el fluido de reacción. Para determinar el primer parámetro, se recurre a la definición proporcionada por H. Wadell (ecuación 75), destinada a estipular cuánto se parece la forma de un determinado objeto a una esfera perfecta desde un enfoque matemático:

$$\Phi = \frac{\pi^{1/3} \cdot (6 \cdot V_p)^{2/3}}{A_p} \quad (75)$$

que resulta de considerar el cociente entre el área superficial de una esfera (con el mismo volumen que el gránulo de catalizador) y el área superficial de la partícula en cuestión. Teniendo en cuenta que los *pellets* de catalizador tienen forma cilíndrica, su área y su volumen se calculan del siguiente modo:

$$A_p = 2\pi \cdot r_p^2 + 2\pi \cdot r_p \cdot L \quad (76)$$

$$V_p = \pi \cdot r_p^2 \cdot L \quad (77)$$

La esfericidad calculada, necesaria para la determinación de la caída de presión a lo largo del lecho catalítico, se introduce en la tabla 18.

Tabla 18: Cálculo de la esfericidad para la aplicación de la Ecuación de Ergun

r_p (m)	L (m)	Φ
0.0009	0.004	0.82

Para el cálculo de la viscosidad de una mezcla de gases se emplea el método propuesto por Davidson donde únicamente se requieren tres datos: la composición de la mezcla y las masas moleculares y viscosidades de los compuestos puros que forman parte de la mezcla. Puesto que es una mezcla reaccionante cuya composición va cambiando a medida que el fluido interacciona con el lecho catalítico, la viscosidad se calculará como la media de los valores a la entrada y a la salida del reactor.

A partir de la composición de la mezcla se calcula su fracción de momento lineal; empleando una función cuadrática que involucra estos fenómenos de transporte se calcula la fluidicidad, teniendo en cuenta además el factor de eficiencia de transferencia de momento lineal entre cuerpos de diferente masa a través de una constante empírica. Finalmente, la viscosidad se calcula como la inversa de la fluidicidad. El procedimiento se detalla a continuación:

La fracción molar se utiliza con mucha frecuencia como la variable para expresar la composición de una mezcla. Existen otros métodos, como el propuesto por Wilke, que pretenden proporcionar la viscosidad a partir de una mezcla a partir de la relación entre las fracciones molares; sin embargo, esta teoría falla partiendo del hecho de que la viscosidad únicamente está asociada al transporte de momento lineal de un punto del fluido a otro (características reológicas). Esto sugiere que la fluidicidad (capacidad de fluir) de una mezcla de gases debería depender del momento lineal de los compuestos elementales en vez de estar sujeta a las composiciones; es por este motivo por el que se utiliza la fracción de momento como principal variable composicional.

El momento lineal está relacionado con la masa molecular y la temperatura (agitación térmica de las partículas gaseosas elementales que forman la mezcla) a partir de la ecuación de Herning-Zipperer, que es equivalente a una suma ponderada de las viscosidades parciales (analogía con el método propuesto por Wilke):

$$p = \sqrt{3 \cdot M_m \cdot k_B \cdot T} \quad (78)$$

donde k_B es la Constante de Boltzmann, que relaciona la energía cinética media de las partículas en fase gas con la temperatura del gas ($k_B=1.38 \times 10^{-23}$ J/K), empleando unidades de entropía.

La fracción de momento de un determinado componente se determina como la fracción del momento total en el seno de la mezcla que está asociada con el compuesto en particular:

$$y'_i = \frac{y_i \cdot \sqrt{M_{m,i}}}{\sum_i (y_i \cdot \sqrt{M_{m,i}})} \quad (79)$$

donde los y'_i hacen referencia a las fracciones de momento y los y_i a las fracciones molares. En términos de estas fracciones de momento lineal se puede expresar la frecuencia de colisiones entre dos tipos de moléculas i y j , considerando que la fluidicidad de un gas ideal es dependiente del cuadrado del momento lineal medio de las moléculas.

Cuando se habla de una mezcla de gases, se establece el concepto de dilución cuando la energía potencial debido a las fuerzas intermoleculares es despreciable en comparación con la energía cinética de translación en algún punto del camino de las moléculas entre colisiones. Bajo esta restricción según la Teoría de Colisiones, los choques simultáneos entre tres o más cuerpos es tan poco común que no contribuyen a las propiedades globales del sistema.

La eficiencia de transferencia de momento lineal en una colisión entre dos cuerpos depende de sus masas (Ley de Conservación de la Cantidad de Movimiento, definiéndose esta como el producto de la masa por el vector velocidad). Tras un desarrollo matemático basado en cálculos simples, se llega a la siguiente expresión para determinar la eficiencia de transferencia de momento:

$$E_{i,j} = \frac{2 \cdot \sqrt{M_i} \cdot \sqrt{M_j}}{M_i + M_j} \quad (80)$$

que lógicamente tiene un valor máximo correspondiente a la unidad para la colisión de dos cuerpos de igual masa. Esta eficiencia se relaciona con el coeficiente de mezcla a partir de una constante empírica siguiendo una ley de la potencia simple:

$$B_{i,j} = E_{i,j}^A \quad (81)$$

sabiendo que el valor del exponente es el mismo para todas las mezclas de gases. Mediante un estudio llevado a cabo por Davidson et al. se ha determinado el valor de la constante empírica A para las viscosidades de 164 mezclas de gases, obteniendo un valor de $A=0.375$. La ecuación básica de la fluidicidad se refina prestando atención a todas estas consideraciones:

$$f = \sum_{i,j} \left(\frac{y'_i \cdot y'_j}{\sqrt{\mu_i} \cdot \sqrt{\mu_j}} \cdot B_{i,j} \right) \quad (82)$$

en donde los μ_i son las viscosidades de los compuestos elementales que forman parte de la mezcla. Finalmente, la viscosidad se define como la inversa de la fluidicidad:

$$\mu_m = 1/f \quad (83)$$

Teniendo en cuenta que la corriente de reactivos a la entrada del reactor está compuesta casi enteramente por etanol, se considera que la viscosidad de la corriente coincide con la del etanol a 220°C y 20 bar. Para la corriente de productos a la salida del reactor, se aplica el Método de Davidson para calcular la viscosidad de la mezcla gaseosa; los datos necesarios se enseñan en la tabla 19.

Tabla 19: Parámetros necesarios para la aplicación del Método de Davidson

Especie química	y_i	$M_{m,i}$ (kg/kmol)	μ_i (kg/m s)
Etanol	0.35	46.07	1.17×10^{-5}
Acetaldehído	0.02	44.05	1.30×10^{-5}
Acetato de etilo	0.60	88.11	1.25×10^{-5}
Hidrógeno	0.03	2.02	1.30×10^{-5}
Acetaldol	0.005	88.11	3.18×10^{-4}

Los resultados obtenidos, tanto del método de Davidson como de la Ecuación de Ergun se muestran en la tabla 20.

Tabla 20: Caída de presión de la mezcla reaccionante que fluye por los tubos del R-201

Parámetros	Valor
Viscosidad entrada al reactor (kg/m s)	1.17×10^{-5}
Viscosidad salida del reactor (kg/m s)	5.56×10^{-5}
Viscosidad media, μ_m (kg/m s)	3.36×10^{-5}
ΔP (bar)	0.20

El valor obtenido de caída de presión, teniendo en cuenta que se opera el reactor a 20 bar, es aceptable por lo que se confirma la validez del criterio escogido para determinar el número de tubos. Una vez confirmado N, el siguiente paso versa acerca del cálculo del diámetro de carcasa que envuelve este haz de tubos y a través de la cual circula el aceite térmico.

2.6.3 Determinación del diámetro de la carcasa

El propósito de este apartado es el de determinar el diámetro de la carcasa destinado a:

- Albergar el haz de tubos donde se aloja el lecho catalítico y por cuyo interior fluye la mezcla reaccionante.
- Habilitar una conducción al fluido térmico que permite operar el R-201 en condiciones óptimas, compensando el carácter endotérmico del sistema reactivo que circula por tubos.

Como se ha indicado anteriormente, debido a que en esencia se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubos, los cálculos realizados en este apartado están estandarizados por la Asociación Americana de Constructores de Intercambiadores de Calor Tubulares, recogidos en el código TEMA. Esquemáticamente, un intercambiador de calor con esta configuración consiste en un haz de tubos encerrado en una carcasa cilíndrica, donde los extremos de los tubos están encajados

en placas planas agujereadas, que separan el lado de carcasa del lado de tubos. Con el fin de sujetar los tubos se incorporan deflectores (*baffles*) del lado de carcasa, que además también aumentan la turbulencia del fluido térmico optimizando la transferencia de calor. Este esqueleto se ilustra en la figura 14:

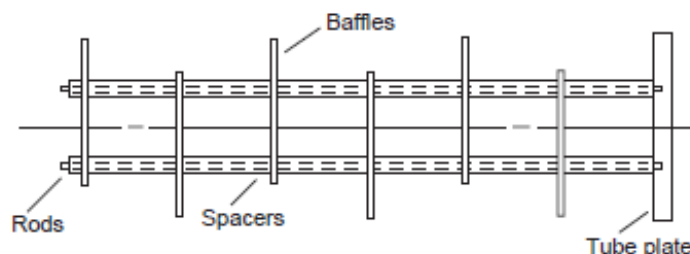


Figura 14: Ensamblado del cuerpo interno de un intercambiador de carcasa y tubos (Sinnott)

La disposición de los tubos en el interior de la carcasa puede adoptar tres configuraciones diferentes: triángulo equilátero, cuadrada o rómbica, siendo en los tres casos el *pitch* (separación entre el centro de los tubos) el 125% del diámetro externo de las conducciones. En tanto al número de pasos, para facilitar la operación en tanto a la modelización de los regímenes de flujo, se considera un único paso por tubos y carcasa.

En líneas generales, la configuración cuadrada se emplea para fluidos sucios susceptibles de dejar costras en la superficie externa de transferencia de calor, ya que la limpieza mecánica del exterior de los tubos es más sencilla. En este caso se opta por una disposición triangular, dado que genera mayores turbulencias y por lo tanto aumenta el coeficiente de convección del lado de carcasa, optimizando la transmisión de calor, a costa de tener una caída de presión más elevada (aunque en este caso sea despreciable, como se calcula en el siguiente apartado del presente Anexo).

El diámetro del haz de tubos depende tanto del número de tubos necesarios como de la configuración adoptada, según la siguiente correlación empírica:

$$D_b = d_o \cdot \left(\frac{N}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (84)$$

En la tabla 21 se recogen los valores de K_1 y n_1 para una disposición triangular con un paso por carcasa y por tubos, así como el diámetro del haz de tubos.

Tabla 21: Cálculo diámetro haz de tubos, con configuración de *pitch* triangular, según Código TEMA

Parámetro	Valor
d_o (m)	0.089
N	240
K_1	0.319
n_1	2.142
D_b (m)	1.95

El diámetro de la carcasa (D_i) se debe seleccionar de modo que garantice un habitáculo para el haz de tubos, reduciendo la circulación del fluido calefactor por el exterior de esta agrupación. La separación entre los tubos exteriores del haz y la pared interna de la carcasa, que recibe el nombre técnico de claridad, depende del tipo de cabezales empleado, como se ilustra en la figura 15.

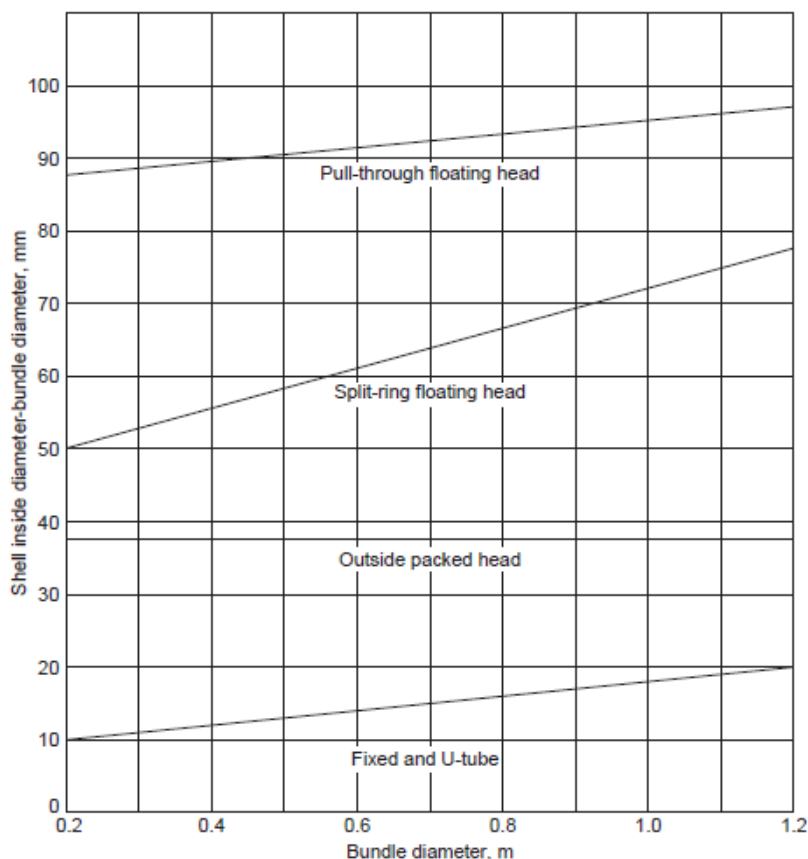


Figura 15: Claridad de la carcasa con respecto al haz de tubos según el tipo de cabezal empleado (Sinnott)

A nivel industrial, uno de los cabezales más utilizados es el anillo dividido con cabezal flotante (*Split-ring floating head*), cuya correlación empírica se extrapola de manera analítica en función de lo presentando en la Figura anterior:

$$\text{Claridad (m)} = 0.0278 \cdot D_b + 0.0444 \quad (85)$$

de tal manera que para el diámetro de haz de tubos calculado con la ecuación 85 se corresponde una claridad de aproximadamente 10 cm. Lógicamente, el diámetro interno de la carcasa se define como:

$$D_i = D_b + 2 \cdot \text{Claridad} \quad (86)$$

Tabla 22: Diámetro interno de la carcasa según estándares TEMA

Parámetro	Valor
D_i (m)	2.15

2.6.4 Caída de presión del fluido calefactor a través de la carcasa

Teniendo en cuenta que el caudal de fluido calefactor resulta de una suposición basada en la cantidad de mezcla reaccionante que circula a través de los tubos, es importante calcular la caída de presión asociada a su flujo para comprobar si se trata de un valor aceptable o no. A pesar de que los deflectores se instalan con el propósito de dirigir el flujo a través de los tubos, el régimen de flujo real será una combinación de flujo cruzado entre los *baffles* y flujo axial en las zonas transversales libres, como se esquematiza en la figura 16.

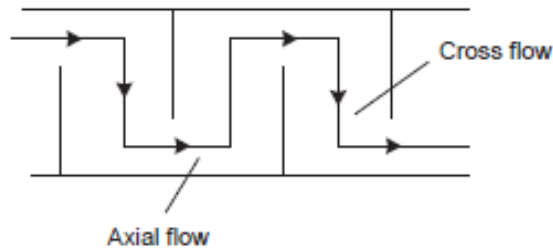


Figura 16: Patrón idealizado del fluido térmico en la carcasa del R-201 (Sinnott)

Este patrón de flujo implica una mayor dificultad a la hora de calcular la pérdida de carga en el lado de carcasa, además de involucrar un gran número de variables en el cálculo. Las primeras correlaciones empíricas comenzaron a aparecer mediada la década de 1960, como la introducida por Kern, cuyo método se basó en el trabajo experimental con intercambiadores comerciales con tolerancias estándar. El procedimiento de cálculo implica el cálculo de una serie de parámetros hipotéticos que tratan de tener en cuenta la variación en el área transversal de flujo a lo largo de la carcasa.

En primer lugar, se calcula el área de flujo cruzado A_s para la hipotética fila de tubos en el ecuador de la carcasa:

$$A_s = \frac{(p_T - d_o) \cdot D_i \cdot l_B}{p_T} \quad (87)$$

donde p_T es el pitch de los tubos ($1.25 \cdot d_o$) y l_B es el espaciado entre deflectores, que adopta un valor de corte de $0.25 \cdot L$ de tal manera que se coloca un *baffle* cada 3 metros.

El siguiente paso consiste en determinar la velocidad en términos másicos ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$) y la velocidad lineal (m/s) del fluido en su circulación a lo largo de la carcasa:

$$G_s = \frac{F_a}{A_s} \quad (88)$$

$$u_s = \frac{G_s}{\rho_A} \quad (89)$$

en donde F_a es el flujo másico (kg/s) de aceite térmico en la carcasa y ρ_A es la densidad del aceite térmico a la temperatura de operación que viene proporcionada por la ficha técnica suministrada por la casa comercial DOW Chemical.

Posteriormente se calcula el diámetro hidráulico del lado de carcasa teniendo en cuenta la configuración triangular adoptada por el haz de tubos:

$$D_h = \frac{1.10}{d_o} \cdot (p_T^2 - 0.917 \cdot d_o^2) \quad (90)$$

Este diámetro hidráulico equivalente se calcula con el fin de computar el Reynolds del lado de carcasa, que involucra además a la velocidad lineal, densidad y viscosidad:

$$Re_s = \frac{\rho_A \cdot u_s \cdot D_h}{\mu_A} \quad (91)$$

Una vez calculado el módulo de Reynolds (coeficiente de las fuerzas inerciales con respecto a las fuerzas viscosas) y establecida la separación entre deflectores, se lee el valor de j_f en la figura 17:

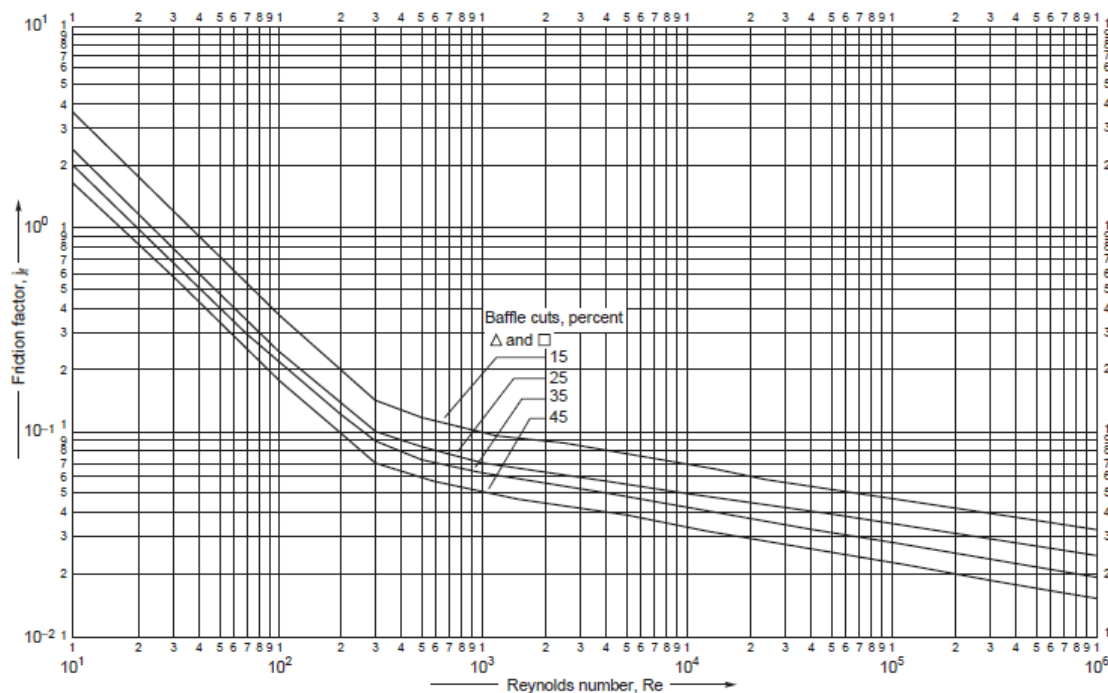


Figura 17: Correlación gráfica para estipular el factor de fricción (Sinnott)

Si uno gusta más de correlaciones analíticas se puede utilizar la ecuación 92, que básicamente modeliza el comportamiento de la gráfica de la Figura 17 para un corte de deflectores del 25%:

$$j_f = e^{0.576 - 0.19 \cdot Re_s} \quad (92)$$

Una vez leído el factor de fricción, se calcula la caída de presión del lado de carcasa se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_f \cdot \frac{D_i}{D_h} \cdot \frac{L}{l_B} \cdot \frac{\rho u_s^2}{2} \quad (93)$$

Los parámetros necesarios para estimar la caída de presión, así como los resultados obtenidos se resumen en la tabla 23.

Tabla 23: Cálculo de caída de presión del fluido térmico en el lado de carcasa

Parámetro	Valor
p_T (m)	0.11
Corte deflectores (%)	25
l_B (m)	3
A_s (m ²)	1.29
G_s (kg/m ² s)	3.23
u_s (m/s)	0.004
D_h (m)	0.063
μ_a (kg/m s)	2.70×10^{-4}
Re_s	754.27
j_f	0.51
ΔP (Pa)	3.52 (DESPRECIABLE)

El valor de la caída de presión es tan pequeño que se puede despreciar, de tal manera que afirmar que el fluido calefactor trabaja en un régimen isobárico en su operación en el interior de la carcasa no es nada descabellado. Esto es causado por su baja velocidad lineal; la velocidad máxima para el flujo de un fluido a través de una carcasa es 0.2 m/s, por lo que la estimación llevada a cabo para fijar el caudal másico de aceite térmico en 15000 kg/h es altamente acertada.

2.7 Selección del material de construcción

Una vez diseñado llevado a cabo el diseño riguroso del cuerpo del reactor, tanto carcasa como tubos, es necesario completar los cálculos mediante el diseño mecánico del propio equipamiento. No obstante, como paso previo conviene elegir de manera justificada el material de construcción dado que en las correlaciones utilizadas por los códigos de diseño aparecen parámetros ligados estrechamente al material utilizado para su fabricación (especialmente la resistencia a la tracción, S).

En lo tocante al criterio de selección, se siguen tres estrategias fundamentales: bien aplicando conocimiento heurístico (la experiencia en un campo como la ingeniería es un intangible tan importante como los conocimientos técnicos), bien mediante el estudio de propiedades críticas (encontrando con ayuda de cálculos de resistencia y aplicando criterios de falla de acuerdo a los esfuerzos aplicados se determinan cuáles son las combinaciones de propiedades más importantes) o bien mediante mapas de lóbulos que comparan propiedades o gráficos de barras; esta última metodología recibe el nombre de su desarrollador teórico, Michael F. Ashby, y es la que se utilizará para elegir de manera razonada el material ingenieril de construcción del reactor catalítico heterogéneo R-201.

Considerando que la operación solo es viable económicamente con la utilización de un fluido calefactor que compense los efectos endotérmicos del sistema reactivo, se busca un material para los tubos que tenga una elevada conductividad térmica, λ_k , dado que

es la propiedad de los materiales que gobierna el flujo de calor en una operación en estado estacionario. Otra consideración importante es que los tubos, al encontrarse la mezcla reaccionante que fluye por su interior a 20 bar, deben estar constituidos por materiales que soporten presiones elevadas.

Por lo tanto, los dos criterios principales atienden a cuestiones operativas y de seguridad. La función del recipiente R-201, en términos de selección de material, es un recipiente a presión donde ha de haber una transmisión de calor efectiva. Las restricciones principales a las que se ve sujeto son unos tubos con elevada conductividad térmica, además de soportar bien presiones elevadas. El objetivo es maximizar la transferencia de calor y la resistencia a la presión, mientras se tratan de disminuir al máximo los costes asociados y la corrosión. La única variable libre de la que se dispone es la selección del material.

2.7.1 Definición de índices de material

En el seno del método Ashby, la capacidad de un material para llevar a cabo una determinada función se caracteriza por una ecuación de rendimiento que contiene grupos de propiedades de materiales, definidos como índices de material. A veces este índice consiste en una propiedad solamente (por ejemplo, si el rendimiento de una viga se mide por su rigidez, la ecuación únicamente tiene en cuenta el módulo elástico). Sin embargo, lo más común es que la ecuación de rendimiento contenga grupos que involucren dos o más propiedades.

En este apartado del trabajo, se introducirá el procedimiento que deriva en la obtención de los distintos índices de material que se deben tener en cuenta para la selección del material de construcción del reactor catalítico heterogéneo R-201.

Atendiendo al funcionamiento del reactor se observa que uno de los puntos claves es la transmisión de calor del fluido de carcasa a la mezcla reaccionante que circula a través de los tubos; un elemento clave en estos dispositivos con configuración de intercambiador de calor es la pared del tubo que separa ambos fluidos, ya que se requiere una transmisión de calor efectiva. Para desarrollar el índice de material correspondiente, se parte de los fundamentos de la transferencia de calor en intercambiadores de calor de carcasa y tubos teniendo en cuenta que esta se lleva a cabo por los mecanismos de conducción y convección, definiendo el flujo por unidad de área (*heat flux*) del siguiente modo:

$$q_{convección} = h_i \cdot \Delta T_1 \quad (94)$$

$$q_{conducción} = \lambda_k \cdot \frac{\Delta T}{t} \quad (95)$$

que son respectivamente la Ley de Newton y la Ley de Fourier que rigen la transmisión de calor por el mecanismo de convección y conducción respectivamente. En la primera de ellas, ΔT_1 se define como la diferencia de temperatura entre el seno del fluido y la superficie de intercambio y en la segunda, λ_k es la conductividad térmica del material

que constituye la superficie de intercambio de calor, t es el espesor y ΔT hace referencia a la caída de temperatura a lo largo de la pared del tubo.

En analogía con las leyes eléctricas de Ohm, todos los mecanismos de transferencia de calor se pueden expresar en forma de resistencia siendo englobados bajo el coeficiente integral de transferencia de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{t}{\lambda_k} + \frac{1}{h_2} \quad (96)$$

pudiendo definir el flujo de calor por unidad de área del siguiente modo:

$$q = U \cdot \Delta T_f \quad (97)$$

en donde ΔT_f es la diferencia de temperaturas entre el fluido que circula por el interior de los tubos y el fluido que circula en el seno de la carcasa. Considerando pues un intercambiador de calor con n tubos de longitud L , diámetro d_i y espesor t , el objetivo consiste en seleccionar un material que maximice el flujo de calor total:

$$Q = q \cdot A = \frac{A \cdot \lambda_k}{t} \cdot \Delta T_f \quad (98)$$

donde A se define como el área efectiva de intercambio de calor. Esta función objetivo se ve sujeta a una serie de restricciones de operación mecánica: el espesor de la pared del tubo debe soportar la diferencia de presión entre el fluido de operación y el fluido de servicio (20 bar y 1 bar respectivamente, en el caso del reactor R-201); esto requiere que el esfuerzo al que se ve sometido la pared permanezca por debajo del límite elástico σ_y del material con el que se ha construido el tubo:

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot r_i}{t} < \sigma_y \quad (99)$$

cuya definición se extrae tras aplicar un análisis de fuerzas básico, característico del estudio de resistencia de materiales. Esta restricción lógicamente se introduce para estipular el valor mínimo del espesor de la superficie de intercambio de calor, por lo que combinando las dos expresiones anteriores se obtiene la función objetivo a maximizar para conseguir el máximo intercambio de calor por unidad de área/volumen:

$$Q = \frac{A \cdot \Delta T_f}{r \cdot \Delta P} \cdot (\lambda_k \cdot \sigma_y) \quad (100)$$

donde los únicos parámetros relativos al material de construcción del intercambiador de calor son la conductividad térmica (propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor, o lo que es lo mismo, la capacidad de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes) y el límite elástico (tensión máxima que puede soportar un material elastoplástico sin sufrir deformaciones permanentes), de ahí que el índice de material sea:

$$M_1 = \lambda_k \cdot \sigma_y \quad (101)$$

El gráfico utilizado para estudiar el límite elástico contra la conductividad térmica se adjunta en la figura 18; los mapas de lóbulos son altamente comunes durante el

desarrollo del método Ashby debido a que resumen el fundamento teórico que envuelve la deducción de los índices de material de manera muy simplificada y fácil de analizar.

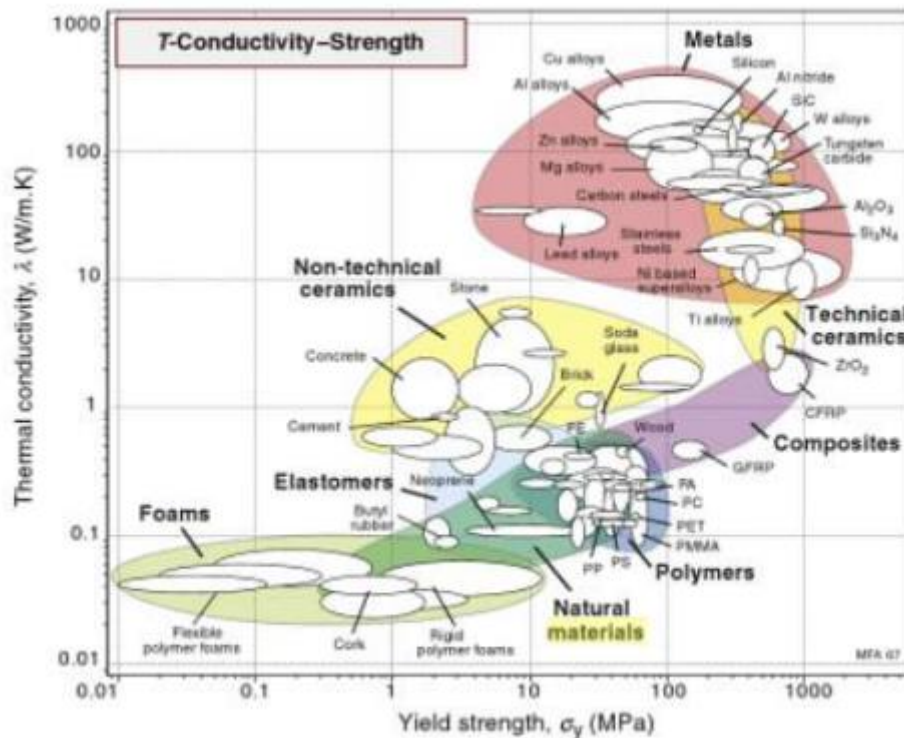


Figura 18: Gráfico en el que se estudia el mejor material de construcción para optimizar la operación de un intercambiador de calor por unidad de área/volumen (Ashby)

El otro punto clave ha de responder a cuestiones de seguridad, dado que los grandes recipientes a presión son diseñados en términos de seguridad bajo el criterio de que una fisura pequeña que se propague de manera inestable acabe teniendo una longitud mayor que el espesor del recipiente en cuestión: *leak before breaking*, asegurando una fuga de muy fácil detección (simple inspección visual) que alivia la sobrepresión de manera gradual.

Mediante un simple análisis de fuerzas, se obtiene la expresión de la tensión a la que se ve sujeto un recipiente a presión de pared delgada (esférico, de radio R). En el diseño mecánico de recipientes a presión, el espesor de la pared se escoge de tal manera que a la presión de trabajo las tensiones generadas sean menores que el límite elástico del material (teniendo en cuenta lógicamente un factor de seguridad):

$$\sigma = \frac{P \cdot R}{2 \cdot t} \quad (102)$$

El diseño seguro de recipientes a presión de gran tamaño se garantiza consiguiendo que una fisura lo suficientemente grande como para atravesar todo el espesor de material continúa siendo estable, para que así la fuga causada por este orificio sea fácilmente detectable y no suponga una situación de riesgo. Esto se consigue configurando el radio

de la fisura, a_c , como la mitad del espesor de la pared; la seguridad se garantiza si el esfuerzo es menor o igual que:

$$\sigma = \frac{C \cdot K_{1c}}{\sqrt{\pi \cdot \frac{t}{2}}} \quad (103)$$

en donde C es una constante cercana a la unidad y K_{1c} es la resistencia a la fractura, introducida a partir de la Teoría de Griffith. Esta función está sujeta a la restricción dada por el análisis de fuerzas, dado por la ecuación 102. Si se combinan ambas expresiones, se obtiene la función objetivo a maximizar para la operación del recipiente a presión de tal manera que fugue antes de romper:

$$p \leq \frac{4 \cdot C^2}{\pi \cdot R} \cdot \left(\frac{K_{1c}^2}{\sigma_y} \right) \quad (104)$$

en donde los únicos parámetros relativos al material de construcción del recipiente a presión son la resistencia a la fracción y el límite elástico, por lo que resulta obvio que para este caso el índice de material será:

$$M_2 = \frac{K_{1c}^2}{\sigma_y} \quad (105)$$

El mapa de lóbulos de Ashby se introduce en la figura 19.

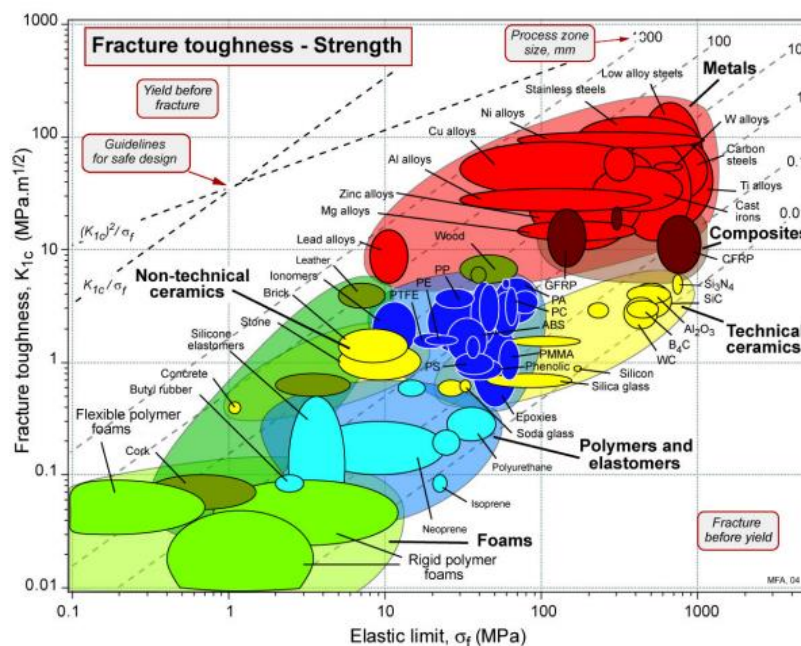


Figura 19: Mapa de lóbulos para el diseño seguro de grandes recipientes a presión (Ashby)

2.7.2 Aplicación de restricciones

Acudiendo al mapa Ashby para el diseño operacional (figura 18) se ve que los materiales con mejor índice M_1 para maximizar la transmisión de calor por unidad de área son: aleaciones de Cu, aleaciones de Al, aleaciones de W, aceros al carbono, aleaciones de Zn, aleaciones de Mg y aceros inoxidables.

Posteriormente se analiza el mapa Ashby para el diseño en términos de seguridad (figura 19), donde los materiales con mejor índice M_2 para que un recipiente a presión fugue antes de romper son: aceros al carbono de baja aleación, aceros inoxidables, aleaciones de Ni, aleaciones de Cu y aleaciones de Al.

Los mejores materiales para una operación efectiva y segura del R-201 son, por lo tanto:

- Aleaciones de cobre
- Aleaciones de aluminio
- Aceros al carbono de baja aleación
- Aceros inoxidables

Las restricciones secundarias a las que se ve sujeta la selección del material versan acerca de cuestiones corrosivas y económicas. Por el lado de la carcasa fluye un aceite térmico (Dowtherm Q) que es una mezcla de difeniletano y compuestos aromáticos alquilados, por lo que a efectos prácticos se puede considerar como una mezcla de disolventes orgánicos. Para estudiar los efectos de la corrosión, se emplean diagramas como el que se adjunta en la figura 20.

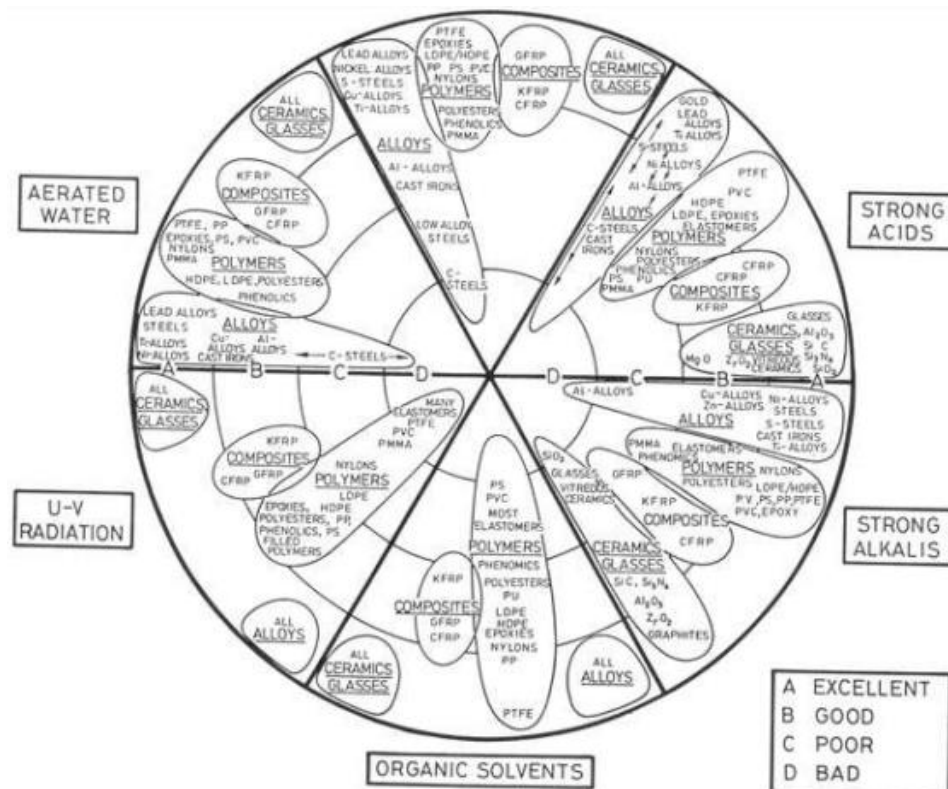


Figura 20: Diagrama para el estudio de los efectos de la corrosión sobre diferentes materiales ingenieriles

Analizando esta figura se puede comprobar como todas las aleaciones metálicas soportan adecuadamente la corrosión de los disolventes orgánicos. En lo tocante al lado de tubos, también circula una mezcla de compuestos orgánicos (etanol, acetaldehído, acetato de etilo y acetaldol) con pequeñas cantidades de hidrógeno gas, que a efectos prácticos es inerte; por lo tanto, se llega a la misma conclusión: todas las aleaciones

metálicas tienen una tolerancia excelente a la corrosión que provocan los compuestos de la mezcla reaccionante.

Por lo tanto, tras aplicar las tres restricciones fundamentales, la búsqueda del material de construcción se ha visto reducida a 4 grupos. La criba final viene con la última restricción: abaratar costes, un tópico crítico en cualquier aplicación de ámbito ingenieril. Con este propósito se suelen utilizar gráficos de barras que recogen el abanico de precios aproximado de los materiales de uso más frecuente en la ingeniería; no obstante, en la tabla 24 se tabulan los precios medios en base a la información proporcionada por este tipo de gráficas.

Tabla 24: Información acerca de los precios de los materiales de fabricación que cumplen todos los requisitos

Material de construcción	Coste (\$/kg)
Aleaciones de cobre	3.2-3.5
Aleaciones de aluminio	1.5-1.7
Aceros al carbono de baja aleación	0.81-0.89
Aceros inoxidables	6.5-7.2

El más barato, con gran diferencia, son los *low alloy steels*, de ahí que se escojan estos aceros al carbono de baja aleación como el material de construcción tanto de los tubos como de la carcasa del reactor catalítico heterogéneo R-201.

2.7.3 Características del material de construcción seleccionado

Los aceros de baja aleación constituyen una categoría de materiales ferrosos que exhiben propiedades mecánicas superiores a los aceros al carbono convencionales como resultado de la adición de elementos aleados como níquel, cromo y molibdeno. El contenido de Cr en la aleación oscila entre el 2.07% y el 10%, que marca el límite inferior para los aceros inoxidables.

Existen multitud de aleaciones de aceros al carbono de baja aleación, por lo que las características serán bastante diversas. No obstante, hay estándares de fabricación y testeo, regulados por la ASTM (*American Society for Testing and Materials*), que en cierto modo facilitan la elección definitiva.

Así, para el caso de los tubos se utilizará la aleación ASTM A213 Grado T22, que es el estándar que cubre la fabricación y calidad de los tubos sin costuras destinados a la utilización como medio de transferencia térmica en calderas e intercambiadores de calor. La longitud de construcción de estos tubos está recogida entre 1 y 12 m y la cédula entre 3 y 15 mm, por lo que los parámetros seleccionados en el diseño del reactor tienen consistencia con el estándar de fabricación de las conducciones. La composición elemental de este acero de baja aleación se recoge en la tabla 25.

Tabla 25: Composiciones químicas máximas del acero de baja aleación ASTM A213 Grado T22

C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %	Cr, %	Mo, %
0.15	0.60	0.025	0.025	0.50	2.60	1.13

Para la construcción de la carcasa y de los cabezales se utilizará la aleación ASTM A387 Grado 22, que cubre el estándar de fabricación de placas de acero al carbono de baja aleación destinada a ambientes a elevadas temperaturas en ambientes ricos en moléculas de hidrógeno; se ha utilizado de manera habitual en la industria a lo largo de las últimas décadas, por lo que su validez está de sobra probada. En la tabla 26 se recoge un análisis elemental simple de esta aleación:

Tabla 26: Composición química del acero de baja aleación A387 Grado 22

Nombre genérico	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Mo, %
Cromo 2 1/4	0.17	0.65	0.40	1.15	0.60

2.8 Diseño mecánico

En esta parte del trabajo se realizará el diseño mecánico del reactor catalítico heterogéneo, que a efectos prácticos se tratará como un recipiente a presión. El diseño de recipientes es una tarea especializada que es llevada a cabo por personal cualificado (ingenieros mecánicos) que están constantemente en contacto con los códigos de diseño vigentes y con la metodología a desarrollar para el análisis de tensiones. No obstante, un ingeniero químico será el responsable de desarrollar y especificar la información básica de diseño para un recipiente en particular y por ello es importante que tenga unos conocimientos básicos en esta materia para trabajar de manera efectiva con el especialista.

Otra razón por la cual el ingeniero de proceso debe estar al tanto de los métodos de fabricación, códigos de diseño y otras restricciones en tanto al diseño de recipientes es porque éstas a menudo ofrecen límites a las condiciones de operación de un proceso. Por lo tanto, una comprensión elemental del diseño de recipientes de proceso es necesaria en las etapas preliminares de diseño cuando la gran parte de las correlaciones para estimar costes dependen en la masa de metal empleado, lo cual requiere estimar tanto el volumen del recipiente como el espesor de pared necesario.

Para los propósitos de diseño y análisis, los recipientes a presión se dividen en dos tipos dependiendo de la razón entre el diámetro del mismo y el espesor de la pared: en nuestro caso, como veremos posteriormente, se trata de un recipiente a presión de pared delgada, puesto que este *ratio* es menor que 1:10 (esto se cumple estrictamente en el caso de tubos, pero para la carcasa el ratio es 1:7 aproximadamente; no obstante se diseña igualmente bajo estas consideraciones). El diseño y la construcción de estos recipientes de pared delgada están cubiertos por estándares internacionales y códigos de buenas prácticas: los recipientes a presión de pared delgada entran en la definición dada por la norma de uso más extendido a nivel mundial, que es la ASME Boiler & Pressure Vessel Code, en su Sección VIII División 1, que se aplica a la mayor parte de los reactores de proceso, columnas de destilación, separadores (flashes y decantadores), recipientes de almacenamiento a presión e intercambiadores de calor.

2.8.1 Consideraciones generales de diseño: condiciones de operación y materiales
Los recipientes a presión deben ser diseñados de tal manera que soporten la presión máxima que se alcanza durante la operación en condiciones nominales. Para recipientes expuestos a presión interna (como el reactor R-201), según el código ASME la presión de diseño se define como un 110% de la presión máxima que se alcanza en la operación en condiciones estacionarias:

$$P_{dis} = 1.1 \cdot P_{g,op} \quad (106)$$

en donde $P_{g,op}$ se corresponde con la presión manométrica máxima de operación en el interior del reactor.

Del mismo modo, el código estandarizado también define la temperatura de diseño como la temperatura máxima de operación teniendo en cuenta un sobredimensionamiento por seguridad de 50°F por cuestiones de variación de la resistencia a la tracción de los metales con la temperatura. Así, esta temperatura de diseño es a la cual se evalúa la tensión máxima permisible debe ser tomada como la temperatura máxima de trabajo del material, permitiendo una cierta incertidumbre asociada a la predicción de las temperaturas de la pared del recipiente.

$$T_{dis} = T_{max,op} + 50^{\circ}F \quad (107)$$

donde $T_{max,op}$ es la temperatura máxima de operación en el interior del intercambiador de calor.

Asimismo, la selección del material de construcción del recipiente a presión, justificada debidamente en el apartado 2.7 de este Anexo II. Cálculos Justificativos, también tendrá influencia a la hora del diseño mecánico dado que en las expresiones para el cálculo de espesores de pared de las diferentes partes del recipiente influye la tensión máxima permisible (expresada como S), que es el valor máximo de tensión para el cual un determinado material no experimenta deformación permanente; este valor depende tanto de la composición de la aleación como de la temperatura de diseño. La relación con el espesor requerido es inversamente proporcional puesto que si el material resiste un esfuerzo mayor precisa menos espesor.

La norma ASME proporciona los valores que se deben utilizar para el cálculo del espesor; así, para las aleaciones utilizadas para la carcasa del reactor y los tubos los datos a emplear se resumen en la tabla 27.

Tabla 27: Tensión máxima permisible para los aceros de construcción bajo código ASME BPV S. VIII Div. 1 (Sinnott)

Material	S ₁₀₀ (ksi)	S ₃₀₀ (ksi)	S ₅₀₀ (ksi)	S ₇₀₀ (ksi)	S ₉₀₀ (ksi)
Acero tubos	20.0	17.9	16.2	15.0	13.1
Acero carcasa	17.1	16.6	16.6	16.6	13.6

en donde las S_i representan la tensión máxima permisible de cada aleación de acero a la temperatura i.

La última consideración a tener en cuenta deriva del hecho de que los recipientes de proceso se elaboran a partir de partes preconstruidas (cilindros, cabezales, uniones...) que se enlazan mediante soldadura por fusión. De hecho, el procedimiento más común para la construcción de secciones cilíndricas consiste en proporcionar a las placas planas el grado de curvatura necesario; estas secciones se hacen lo más grande posible para reducir el número de soldaduras requeridas. Las costuras en disposición longitudinal se evitan con el propósito de evitar una conjunción de soldaduras en las esquinas de las placas.

El calentamiento local y la consecuente expansión térmica que se produce durante la operación de soldado puede auspiciar tensiones en la junta, superadas con el post-tratamiento, cuyos estándares se recogen en el código ASME BPV Sección VIII División I Parte UW-40.

El diseño de la junta debe atender a cuatro requerimientos básicos: buena accesibilidad para futuras inspecciones, mínima cantidad posible de metal soldado, buena penetración del metal de soldadura y suficiente flexibilidad como para poder soportar fenómenos de expansión térmica. En este caso, dado que se trata de un reactor químico que trabaja a presión se justifica una eficiencia de soldadura del 100% ($E=1$) sujeta a un examen radiográfico completo, donde las juntas a tope se consiguen mediante doble soldadura. Suponer un factor de soldadura igual a 1 implica que la junta es igual de fuerte que las placas vírgenes que son los caparazones a partir de los cuales se construye la carcasa, siendo necesario recortar cualquier defecto que se encuentre para asegurar que no existan focos preferenciales de tensiones.

El principal inconveniente que presenta escoger esta eficiencia de soldadura es el coste, tanto en fabricación como en mantenimiento. No obstante, al tratarse de un recipiente tan relevante en el cual se lleva a cabo una operación a alta presión, tanto desde un enfoque de optimización operativa como de seguridad es necesario tener una soldadura lo más perfecta posible.

El código ASME BPV Sección VIII División I también recoge que el diseño del recipiente a presión debe presentar un sobredimensionamiento para tener en cuenta la tolerancia del material de construcción a la corrosión. Este parámetro es altamente complicado de estudiar, por lo que al final se recurre a conocimientos heurísticos con la ayuda de inspecciones frecuentes del equipamiento con técnicas de ultrasonidos para analizar el desgaste gradual con el paso del tiempo. Así, para aceros al carbono de baja aleación donde no se espera una corrosión severa, como en este caso, se debe utilizar un sobredimensionamiento de 2 mm; cuando se estimen condiciones más complejas sería necesario incrementar el espesor calculado en 4 mm.

2.8.2 Determinación de espesores mínimos

El código ASME utilizado especifica un espesor mínimo de pared de 1/16 de pulgada (aproximadamente 1.5 mm), sin incluir tolerancia a la corrosión, e independientemente

del material de construcción empleado. Esta medida se toma con el fin de asegurar que cualquier recipiente es lo suficientemente rígido como para soportar su propio peso y cualquier sobrecarga contingencial que pueda suceder. Si se atiende al diámetro del recipiente, el código presenta diferentes espesores mínimos requeridos -incluyendo la tolerancia a la corrosión- para los distintos recipientes, que se explicitan en la tabla 28.

Tabla 28: Espesores mínimos requeridos para recipientes en función de su diámetro (Sinnott)

Diámetro del recipiente (m)	Espesor de pared mínimo (mm)
1.0	5
1.0-2.0	7
2.0-2.5	9
2.5-3.0	10
3.0-3.5	12

De tal manera que si el valor calculado por las expresiones correspondientes es menor al establecido en la tabla anterior, se toma el valor tabulado como espesor del recipiente. Para una carcasa cilíndrica el espesor mínimo para resistir la presión interna se determina a partir de un análisis de fuerzas, de manera análoga a la deducción de la ecuación 102. La ecuación especificada por el código de diseño utilizada, en su parte UG-27, para tensión radial es:

$$t_{radial} = \frac{P_i \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot E - 1.2 \cdot P_i} \quad (108)$$

Puesto que la geometría del recipiente es cilíndrica, el espesor se ha de diseñar de tal manera que también soporte las tensiones de tipo longitudinal, especificado por la expresión siguiente:

$$t_{longitudinal} = \frac{P_i \cdot D_i}{4 \cdot S \cdot E - 0.8 \cdot P_i} \quad (109)$$

El código ASME BPV aclara que el mínimo espesor de diseño debe ser el mayor de las dos ecuaciones anteriores, como es lógico. Por la forma de las ecuaciones anteriores es fácil observar que el valor mayor suele ser el proporcionado para soportar tensiones del tipo radial.

El procedimiento de cálculo de los espesores mínimos seguirá dos vertientes diferentes: primeramente, se calculará el espesor mínimo para los tubos de tal manera que se comprueba que la cédula escogida es lo suficientemente grande como para garantizar una operación segura. Posteriormente se determinará el espesor mínimo que debe adoptar la carcasa del reactor para garantizar un diseño seguro del recipiente a presión. Los datos necesarios para el cálculo del espesor de los tubos, así como el resultado obtenido, se recogen en la tabla 29.

Tabla 29: Cálculo del espesor de los tubos

Parámetro	Valor
$P_{g,op}$ (bar)	19
P_{dis} (bar)	20.9
P_{dis} (psi)	303.13
d_i (mm)	77.9
S (psi)	15000
E	1
t_{radial} (mm)	2.80
$t_{longitudinal}$ (mm)	2.40

Por lo tanto, el espesor mínimo de los tubos debe ser de 2.80 mm; para las conducciones estandarizadas escogidas, el diámetro nominal de 80 mm y la cédula 40 se corresponde con un espesor de 5.5 mm, por lo que el sobredimensionamiento es casi cercano al 100%, lo cual es justificable para operaciones a presión elevada por encima de 15 bar.

Una vez comprobada la validez del espesor de los tubos del reactor R-201, se procede a calcular el espesor mínimo de la carcasa del reactor, nuevamente según las especificaciones del código de diseño empleado a lo largo de esta sección. Los datos obtenidos se resumen en la tabla 30.

Tabla 30: Cálculo del espesor de la carcasa

Parámetro	Valor
$P_{g,op}$ (bar)	1
P_{dis} (bar)	1.1
P_{dis} (psi)	15.95
d_i (mm)	2152.49
S (psi)	16600
E	1
t_{radial} (mm)	3.03
$t_{longitudinal}$ (mm)	2.52

No obstante, como se indica en la Tabla 28, el espesor mínimo para un recipiente a presión -incluyendo factor de tolerancia a la corrosión- con un diámetro de entre 2 y 2.5 m ha de ser de 9 mm, de ahí que se concluya que este es el espesor necesario para el diseño seguro de la carcasa del reactor R-201 según los requerimientos del Código ASME. Por tanto, el espesor estandarizado que se utilizará para la carcasa será de 3/8 de pulgada.

Una vez se han estipulado los requerimientos de diseño mecánico para el cuerpo del reactor, es necesario hacer hincapié tanto en los cabezales del recipiente cilíndrico como en las placas superiores e inferiores que sujetan los tubos del intercambiador de calor. Los cabezales y/o cierres pueden adoptar diferentes geometrías: planas o abombadas

(hemisférica, elipsoidal y torisférica), todas ellas sujetas a los mismos estándares de diseño.

Se define como cabezal a la cubierta con la que se cierra tanto la parte superior como la inferior de un recipiente cilíndrico (fija, soldada, o extraíble). La última de las opciones presenta una mayor facilidad en las operaciones de mantenimiento, pero implica una inversión mayor y un diseño más complejo.

Los cierres planos se utilizan principalmente para encarrillar a los tubos en un intercambiador de calor; se trata de la opción más económica pero sus aplicaciones son reducidas debido a sus terminaciones poco eficientes, lo cual propicia un aumento del grosor considerable. El código ASME BPV Sección VIII División I establece que el espesor mínimo para un cabezal plano viene dado por:

$$t_{plano} = D_e \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P_i}{S \cdot E}} \quad (110)$$

en donde D_e es el diámetro nominal del plato (en este caso coincidente con el diámetro interno de la carcasa puesto que el cabezal plano se alberga en el interior de la misma) y C es una constante dependiente del diseño del cabezal; para la aplicación de este cierre en el reactor, al tratarse de placas soldadas en ambos extremos de la carcasa con una soldadura de filete con un ángulo de 45° como se puede observar en la figura 21, la constante C adopta un valor de $t_{plano}/t_{carcasa}$.

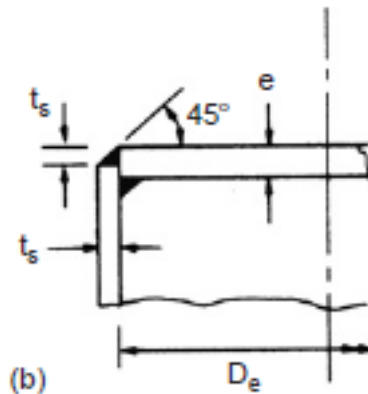


Figura 21: Configuración de las placas planas que encarrilan los tubos en el seno del reactor (Sinnott)

Los cabezales abombados adoptan diferentes configuraciones en función de su ámbito de uso. Los más comúnmente empleados a escala industrial son los siguientes, y su representación esquemática se adjunta en la figura 22 tras una breve explicación de cada uno de ellos:

- Los cabezales torisféricos son los más ampliamente empleados a presiones bajas (hasta 15 bar), puesto que es la configuración más económica para esta casuística. Pueden ser utilizados para presiones más elevadas, pero por encima

de 10 bar se encarecen. Su relación geométrica entre ejes de 3:1 le da gran uso a nivel industrial puesto que son relativamente sencillos de fabricar.

- Los cabezales elipsoidales son la opción más económica cuando se trabaja a presiones elevadas (por encima de 15 bar) puesto que el espesor necesario es similar al calculado para la carcasa si es cilíndrica. Su relación entre ejes es 2:1.
- Los cabezales hemisféricos son la forma más resistente, capaces de aguantar el doble de presión que un cabezal torisférico del mismo espesor. El peaje a pagar, nunca mejor dicho, es su precio más elevado. Son la opción más recomendada para presiones por encima de 50 bar. Su relación entre ejes de 1:1 le confiere mayor volumen que los demás, proporcionando así una mayor resistencia a la presión; el espesor calculado se suele corresponder con la mitad del espesor de la carcasa.

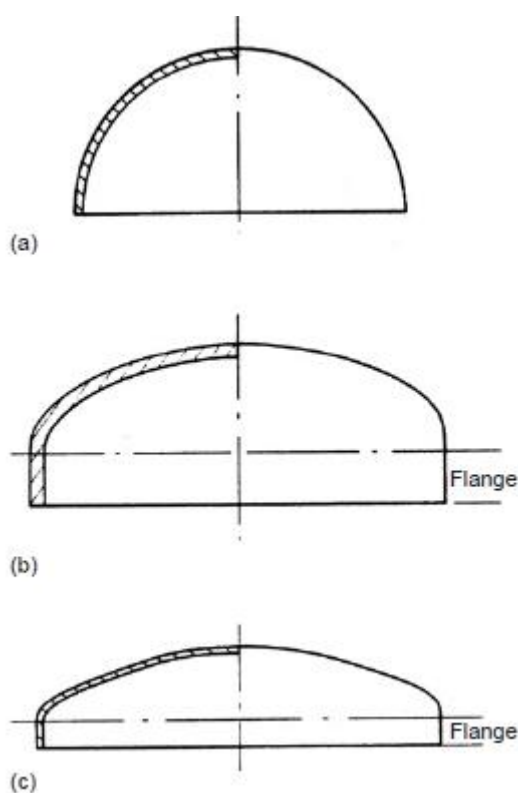


Figura 22: Cabezales abombados. (a) Hemisférico. (b) Elipsoidal. (c) Torisférico (Sinnott)

La relación entre el diámetro del cabezal y sus dimensiones más importantes también está recogida por los estándares de diseño, como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31: Dimensiones más importantes de los cabezales abombados en relación con el diámetro (Sinnott)

Cabezal	Volumen (m ³)	Área (m ²)	Altura (m)
Torisférico	$0.08089 \cdot D^3$	$0.931 \cdot D^2$	$0.169 \cdot D$
Elipsoidal	$0.13075 \cdot D^3$	$1.08 \cdot D^2$	$0.25 \cdot D$
Hemisférico	$0.26103 \cdot D^3$	$1.57 \cdot D^2$	$0.5 \cdot D$

Teniendo bajo consideración las condiciones de operación y los costes asociados, se opta por escoger una geometría elipsoidal de los cabezales, dado que es la opción más económica para presiones mayores a 15 bar. La expresión, según el código de diseño utilizado, para estipular el espesor mínimo es:

$$t_{elipsoidal} = \frac{P_i \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_i} \quad (111)$$

Para determinar qué parámetros aplican en la determinación de los espesores de los cabezales del reactor (ecuación 111) y de los cierres del intercambiador de calor (ecuación 110) es importante tener en cuenta el funcionamiento del equipo: por los cabezales inferior y superior es por donde fluyen los reactivos y los productos de reacción a alta presión, respectivamente. En cambio, para el diseño mecánico de las placas planas la presión que aplicará será la del fluido de servicio, ya que están destinadas a evitar la mezcla del aceite térmico con la mezcla reaccionante en los cabezales del reactor. Así, los resultados obtenidos se adjuntan en la tabla 32.

Tabla 32: Diseño mecánico estandarizado para cierres y cabezales del reactor

Parámetro	Valor
$t_{elipsoidal}$ (mm)	21.69
$t_{cabezales}$ estandarizado (in)	12/13
$t_{cierres}$ planos (mm)	163.27
$t_{cierres}$ estandarizado (in)	13/2

2.8.3 Análisis de tensiones y diseño del soporte del reactor R-201

Los recipientes a presión están sujetos a muchas otras cargas en adición a la presión interna y deben ser diseñados para soportar la peor combinación de esfuerzos sin fallo. En este apartado se lleva a cabo un análisis de tensiones que tiene en cuenta todas las cargas principales que han de ser consideradas en el diseño del recipiente, según recomendaciones del código de diseño.

Un estudio profundo de las tensiones (que implica la determinación de los esfuerzos cortantes y los momentos flectores) para determinar el efecto de las cargas secundarias (tensiones locales causadas por soportes, estructuras internas, arietes de fluido, diferencias de temperatura o presión) solo es requerido cuando no es posible determinar la validez del diseño por otras medidas (por ejemplo, mediante comparación con otros recipientes ya existentes).

Sin embargo, es importante tener presente que un recipiente no debe estar sujeto a todas las cargas de manera simultánea, sino que el diseñador ha de determinar qué combinación de posibles cargas proporciona la peor situación, y posteriormente diseñar para esa condición. En este caso, el criterio de diseño va a tener en cuenta:

- Peso muerto del recipiente.

- Peso tubos llenos de catalizador.
- Peso estructura llena de fluido.
- Peso aislante.

Con el fin de ejecutar cálculos preliminares, se puede suponer que el peso muerto de un recipiente cilíndrico con cabezales abombados se obtiene mediante la siguiente correlación empírica:

$$W_v = C_w \cdot \pi \cdot \rho_m \cdot D_m \cdot g \cdot (H_v + 0.8 \cdot D_m) \cdot t \quad (112)$$

donde C_w asume un valor de 1.15 para recipientes con numerosos accesorios internos, ρ_m es la densidad del acero al carbono de baja aleación que se utiliza para construir el recipiente, D_m es el diámetro medio del recipiente (considerado como la suma del diámetro interno y el espesor), g es la aceleración de la gravedad y H_v es la altura entre líneas tangentes (de la sección cilíndrica), que coincide con la longitud de los tubos. El cálculo del peso muerto del recipiente se introduce en la tabla 33.

Tabla 33: Cálculo del peso muerto del recipiente

Parámetro	Valor
C_w	1.15
ρ_m (kg/m ³)	7800
D_m (m)	2.16
g (m/s ²)	9.81
H_v (m)	12
t (m)	0.009
W_v (kN)	73.83

Una vez calculado el peso de las carcasas se estudia el efecto del peso de los tubos, tanto vacíos como llenos de catalizador. Para ello, se parte de cuestiones geométricas relativas al volumen de tubos concéntricos:

$$V_{tubos} = N \cdot \pi \cdot \frac{d_o^2}{4} \cdot L - \pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot L \quad (113)$$

una vez determinado el volumen que ocupan los tubos, con el dato de la densidad del acero al carbono de baja aleación se puede determinar su masa; con la masa y la gravedad es fácil determinar el peso. En lo tocante al catalizador, se sabe la cantidad necesaria para llevar a cabo la operación, por lo que también bastaría con tener en cuenta los efectos gravitatorios para determinar el peso. Los datos necesarios para su cómputo, así como los resultados obtenidos, se exhiben en la tabla 34.

Tabla 34: Cálculo del peso de los tubos llenos de catalizador

Parámetro	Valor
d_i (m)	0.0779
d_o (m)	0.0889
L (m)	12
N	240
V_{tubos} (m ³)	4.15
$\rho_{\text{acero tubos}}$ (kg/m ³)	7760
W_{tubos} (kN)	315.94
W_{cat} (kg)	13000
W_{cat} (kN)	127.53
$W_{\text{tubos llenos}}$ (kN)	443.47

Otra componente importante en lo relativo a la aparición de tensiones es la presencia del fluido térmico, dado que la carcasa alberga un gran volumen en su interior. El volumen interno consiste en el volumen de la carcasa menos el volumen que ocupan los tubos:

$$V_{\text{aceite}} = \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \cdot L - V_{\text{tubos}} \quad (114)$$

Asumiendo la densidad del aceite térmico a la temperatura media de operación, el peso de todo el fluido calefactor que puede acoger la carcasa se calcula del modo estipulado en la tabla 35.

Tabla 35: Determinación del peso de la máxima cantidad de aceite térmico que puede albergar el reactor

Parámetro	Valor
D_i (m)	2.15
L (m)	12
V_{aceite} (m ³)	39.52
ρ_A (kg/m ³)	814.2
W_{aceite} (kN)	315.61

La última carga a considerar consiste en el peso del aislante que cubre la cara exterior de la carcasa del reactor R-201. En la operación nominal circula un fluido calefactor por carcasa por lo que es importante un correcto aislamiento para que la transmisión de calor se produzca únicamente al líquido que fluye por el interior de los tubos y no al exterior. Algunos de los materiales aislantes más empleados a nivel industrial son: lana de vidrio, lana mineral, espuma aislante y silicato de calcio.

Con el propósito de determinar el peso de aislante es necesario determinar su espesor mediante la aplicación de un balance de energía. Para ello se considera el peor escenario

posible, o lo que es lo mismo, el caso para el máximo flujo de calor hacia el exterior considerando dos mecanismos de transmisión: conducción a través del espesor de la carcasa y convección desde el exterior de la carcasa al ambiente. En analogía eléctrica con la Ley de Ohm, se puede modelizar la transferencia del siguiente modo:

$$Q_{max} = \frac{(T_i - T_o) \cdot 2\pi\lambda_k L}{\ln r_o/r_i} + \frac{(T_o - T_{amb})}{\frac{1}{2\pi r_o L \cdot h_{aire}}} \quad (115)$$

$$Q_{max} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_i - T_{amb}}{\frac{\ln r_o/r_i}{2\pi\lambda_k L} + \frac{1}{2\pi r_o L \cdot h_{aire}}} \quad (116)$$

en donde T_i se corresponde con la temperatura de la cara interna de la carcasa (coincidente con la temperatura de entrada del aceite térmico al reactor, para así tener en cuenta el peor escenario posible en términos de pérdidas de calor al disponer de la máxima fuerza impulsora), T_{amb} es la temperatura del ambiente, r_o es el diámetro externo de la carcasa, r_i el diámetro interno, L es la longitud de la carcasa, λ_k la conductividad térmica del acero que constituye la carcasa.

El coeficiente de convección del aire, h_{aire} , entorno a un cilindro grande cuya circulación se justifica mediante convección forzada se calcula a partir de la siguiente correlación empírica que involucra al módulo adimensional de Nusselt, obtenida de la obra editada por Incropera:

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right)^{4/5} \quad (117)$$

Los datos necesarios para calcular los números de Reynolds y de Prandtl, así como el Nusselt obtenido y el coeficiente de convección determinado se presentan en la tabla 36.

Tabla 36: Cálculo del coeficiente de convección forzada del aire, para determinar pérdidas de calor (Incropera)

Parámetro	Valor
ρ_{aire} (kg/m ³)	1.19
v_{aire} de 15 km/h (m/s)	4.17
D_o (m)	2.17
μ_{aire} (kg/m s)	1.81×10^{-5}
$C_{p,aire}$ (J/kg K)	1006.86
$\lambda_{k, aire}$ (W/m K)	0.026
Pr	0.71
Nu	803.61
h_{aire} (W/m ² K)	9.53

Una vez determinado el coeficiente de convección del aire, se busca en la bibliografía correspondiente la conductividad térmica de la aleación con la que se ha construido la carcasa para poder utilizar la ecuación 116 con el propósito de calcular el flujo de calor máximo. Puesto que el flujo de calor es constante a lo largo de todas las resistencias, es posible obtener T_o , la temperatura de la cara externa del reactor aplicando la expresión 118, que solamente tiene en cuenta la transmisión de calor por el mecanismo de conducción a través de la carcasa del reactor:

$$Q_{max} = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln r_o/r_i}{2\pi kL}} \quad (118)$$

con lo que se puede calcular el espesor del aislante teniendo en cuenta los mismos principios:

$$r_{ais} = r_o \cdot e^{\frac{2\pi k_{ais} L \cdot (T_o - T_{amb})}{Q_{max}}} \quad (119)$$

de tal manera que el espesor del aislante se pueda obtener con la siguiente relación:

$$t_{ais} = r_{ais} - r_o \quad (120)$$

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 37 donde se constata analíticamente la teoría implícita en los cálculos, ya que la temperatura de la cara externa de la carcasa es prácticamente idéntica a la temperatura de la cara interna debido a la gran conductividad térmica del acero de baja aleación y el espesor del aislante concuerda con los datos habitualmente disponibles a nivel industrial:

Tabla 37: Determinación del espesor del aislante

Parámetro	Valor
Q_{max} (kW)	190.05
T_o (K)	559.56
t_{ais} (mm)	6.10

Pudiendo determinar el volumen necesario empleando parámetros geométricos:

$$V_{ais} = \pi \cdot D_o \cdot L \cdot t_{ais} \quad (121)$$

Los resultados obtenidos, en términos de tensiones, se resumen en la tabla 38.

Tabla 38: Peso asociado al aislante del reactor R-201

Parámetro	Valor
$\lambda_{k,aislante}$ (W/m K)	0.058
$\rho_{aislante}$ (kg/m ³)	0.50
$V_{aislante}$ (m ³)	91
W_{ais} (kN)	0.45

Como aislante se empleará una fibra mineral de la casa ROCKWOOL, especializada en aislamiento térmico a nivel industrial, que responde al nombre de ProRox® MA 960^{NA}, basada en un entramado de lana de roca diseñado para aplicaciones industriales a

elevada temperatura donde se requiere una cierta flexibilidad. Se trata de un producto especializado para recipientes de gran diámetro cuyas propiedades se han testeado de acuerdo con los estándares estipulados por la norma ASTM C553, de especificaciones para almohadillas de fibra mineral destinadas al aislamiento térmico en aplicaciones comerciales e industriales.



Figura 23: Fibra mineral escogida para realizar el aislamiento térmico del reactor

El análisis de tensiones finaliza con el estudio de las cargas por viento, especialmente importantes en el caso de columnas altas instaladas al aire libre; normalmente estas columnas están montadas en soportes de falda y no están adjuntas a una estructura de acero. Bajo estas condiciones el recipiente ante cargas de viento se comporta como una viga en voladizo, tal y como se ilustra en la figura 24.

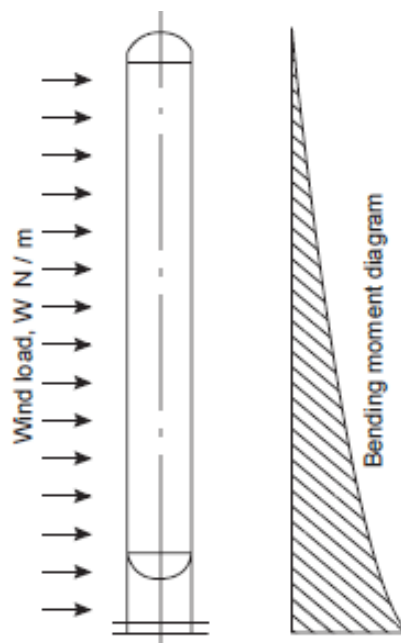


Figura 24: Cargas por viento en una columna vertical alta (Sinnott)

La carga que supone la acción del viento en una estructura va a depender de la forma y de la velocidad del mismo; como referencia se asume una velocidad del viento de 160 km/h y la forma de la columna se computa en el factor de forma C_d , que también tiene en cuenta la velocidad del viento a través del número de Reynolds:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} C_d \rho_{aire} u_{viento}^2 \quad (122)$$

Sin embargo, para una columna de forma cilíndrica sin muchos accesorios externos la expresión anterior se simplifica empleando la siguiente correlación semiempírica:

$$P_{viento} = 0.05 \cdot u_{viento}^2 = 1280 \text{ Pa} \quad (123)$$

donde la velocidad del viento se indica en km/h y la presión inducida por la carga viene dada en unidades SI (Pa). Si el exterior de la columna requiere de anexos como escaleras o complejos sistemas de valvulería, se recomienda aumentar el valor del factor de forma hasta 0.07. Una vez determinada la presión inducida por el viento, se determina la carga por unidad de longitud teniendo en cuenta el diámetro total de la columna:

$$F_w = P_{viento} \cdot D_{total} \quad (124)$$

en donde el diámetro total tiene en cuenta la presencia del aislante. Con el valor de F_w determinado, el momento flector máximo (en la base de la columna) se calcula del siguiente modo:

$$M_{max} = \frac{F_w \cdot H_{total}^2}{2} \quad (125)$$

sumando la altura de los cabezales a la longitud de los tubos para estipular la altura total del reactor catalítico heterogéneo.

Este estudio de tensiones tiene como propósito final el diseño del soporte del recipiente; en este caso, puesto que se trata de una columna alta en disposición vertical se opta por un soporte de falda, como el esquematizado en la figura 25.

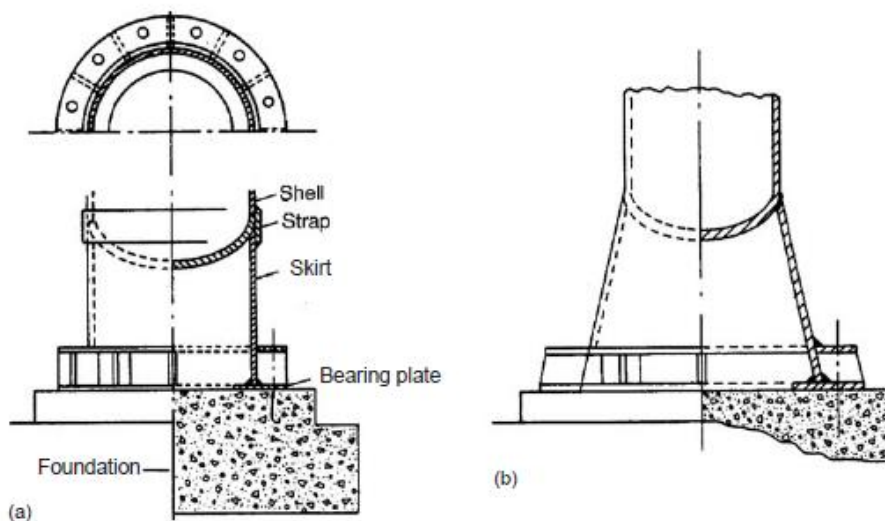


Figura 25: Soportes de falda. (a) Falda recta. (b) Falda cónica. (Sinnott)

Los soportes deben ser diseñados de tal manera que sean capaces de aguantar el peso muerto del recipiente y sus accesorios internos, así como el peso del catalizador y del fluido calefactor, además de cargas superpuestas como las debidas al viento. Los soportes supondrán focos de tensión en la pared del recipiente y el diseño debe ser realizado de tal manera que se asegure que los esfuerzos cortantes generados estén por debajo del esfuerzo máximo permisible; es por este motivo por el cual los soportes de falda son los preferidos para altos recipientes verticales, ya que no imponen cargas concentradas a la carcasa del recipiente. Asimismo, los soportes deben proporcionar un acceso sencillo y rápido tanto al recipiente como a los accesorios para inspección y mantenimiento.

Profundizando en los soportes de falda, estos consisten en un cuerpo cilíndrico o cónico unido a la base del recipiente mediante soldadura, donde una brida en el fondo de la falda transmite la carga al suelo. Los orificios que se proporcionan en el soporte para el acceso y la conexión de tuberías tienen que ser debidamente reforzados. La falda se puede soldar al recipiente de tres maneras diferentes, tal y como muestra la figura 26; normalmente se opta por la configuración de soldadura a ras del recipiente, que es la finalmente escogida.

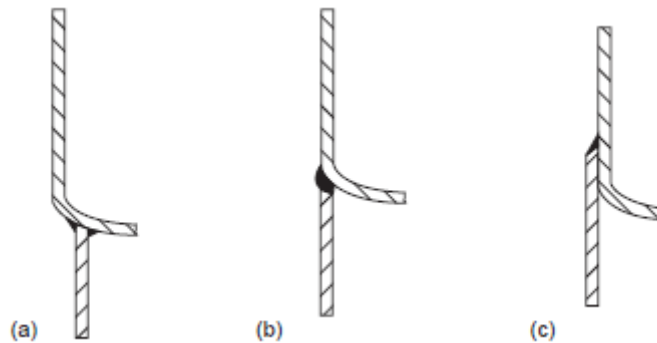


Figura 26: (a) Soldadura en la parte inferior. (b) Soldadura a ras del recipiente. (c) Soldadura en el exterior de la carcasa (Sinnott)

El espesor de la falda debe ser lo suficientemente grande como para soportar las cargas de peso muerto y los momentos flectores impuestos sobre el recipiente. Los esfuerzos resultantes en tracción y compresión son diferentes, pero ambos involucran los mismos parámetros: σ_{bs} o tensión en la falda debido al momento flector y σ_{ws} o tensión en la falda debida al peso total del recipiente, que se definen del siguiente modo:

$$\sigma_{bs} = \frac{4 \cdot M_{max}}{\pi \cdot (D_s + t_{falda}) \cdot t_{falda} \cdot D_s} \quad (126)$$

$$\sigma_{ws} = \frac{W_{total}}{\pi \cdot (D_s + t_{falda}) \cdot t_{falda}} \quad (127)$$

en donde M_{max} es el momento flector máximo, evaluado en la base del soporte, debido a cargas por viento, W_{total} es el peso total del recipiente (teniendo en cuenta peso muerto, peso de los tubos, peso del catalizador, peso del fluido térmico y peso del

aislante), D_s es el diámetro de la falda que coincide con el diámetro externo del reactor y t_{falda} es el espesor del soporte.

Los esfuerzos resultantes en tracción y compresión son el valor absoluto de, respectivamente:

$$\sigma_{tracción} = \sigma_{bs} - \sigma_{ws} \quad (128)$$

$$\sigma_{compresión} = \sigma_{bs} + \sigma_{ws} \quad (129)$$

El criterio de diseño utilizado para el diseño del soporte es que bajo la peor combinación de cargas de viento y peso se cumpla lo siguiente:

$$\sigma_{tracción} \leq S \cdot E \cdot \sen \theta_s \quad (130)$$

$$\sigma_{compresión} \leq 0.125 \cdot E_Y \cdot \left(\frac{t_{falda}}{D_s} \right) \cdot \sen \theta_s \quad (131)$$

en donde E_Y es el módulo de Young del material con el que se construye la falda y θ_s es el ángulo de la base de una falda cónica, normalmente entre 80-90°. El valor del espesor del soporte no debe ser menor a 6 mm, por lo que como primera suposición se asume este valor. Los datos empleados, así como los resultados obtenidos, se presentan en la tabla 39.

Tabla 39: Cálculos para determinar los esfuerzos en tracción y compresión a los que se ve sometidos el soporte

Parámetro	Valor
W_{total} (kN)	833.36
P_{viento} (Pa)	1280
D_{total} (m)	2.18
F_w (N/m)	2793.84
H_{total} (m)	13.08
M_{max} (kN·m)	238.86
D_s (mm)	2000
S (N/mm ²)	114.45
E_Y (N/mm ²)	190000
θ_s (°)	90
$t_{supuesta}$ (mm)	6
σ_{bs} (N/mm ²)	12.63
σ_{ws} (N/mm ²)	22.04

suponiendo que el material de construcción del soporte es el mismo acero al carbono de baja aleación que constituye la carcasa del reactor.

Los esfuerzos en tracción y compresión, y los valores característicos del criterio de diseño se muestran en la tabla 40.

Tabla 40: Criterio de diseño para soportes de falda

Parámetro	Valor
$\sigma_{\text{tracción}}$ calculado (N/mm ²)	9.41
$\sigma_{\text{tracción}}$ criterio (N/mm ²)	102.32
$\sigma_{\text{compresión}}$ calculado (N/mm ²)	34.67
$\sigma_{\text{compresión}}$ criterio (N/mm ²)	63.70
t_{falda} estandarizado (in)	11/32

Ambos criterios son satisfechos, por lo que el espesor de la falda supuesto es válido; añadiendo 2 mm de sobrediseño para tener en cuenta la tolerancia a la corrosión se tiene un espesor de diseño de 8mm, que se corresponde con un espesor estandarizado de 11/32 de pulgada. Además, para evitar que los momentos inducidos por el viento y otras cargas laterales vuelquen el recipiente se introduce un doble anillo reforzado con un espigote y sujeto al suelo con un perno. Esta configuración se esquematiza en la ilustración (c) de la figura 27.

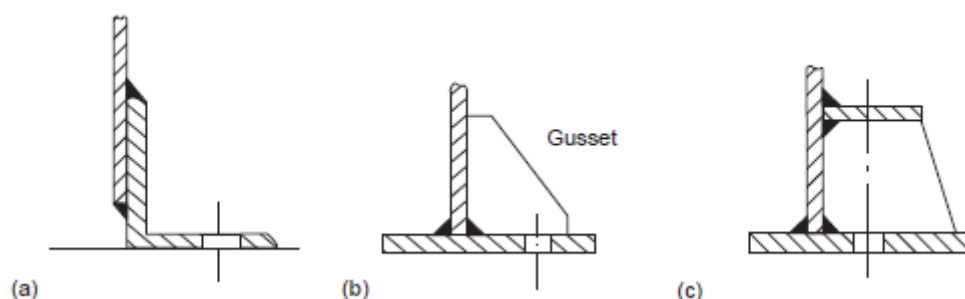


Figura 27: Diseño de anillos de brida. (a) Laminado (b) Placa simple con refuerzo (c) Doble anillo con refuerzo (Sinnott)

2.9 Dimensionamiento de la válvula de alivio

Tal y como se ha explicado en la Memoria del documento, es necesario incluir una válvula de alivio con el propósito de proteger el equipamiento de una potencial explosión cuando se produce una sobrepresión.

En la Memoria se explicita la metodología a seguir para el dimensionamiento del dispositivo de alivio; en esta parte del Anexo II se indicarán los cálculos llevados a cabo, subordinados al criterio de diseño seleccionado, que en este caso está sujeto al vaciado de la totalidad de la mezcla reaccionante en un tiempo asumido como seguro, 5 min. Hay que tener en cuenta que, debido a la mecánica de funcionamiento del R-201, la sobrepresión se puede producir en el interior del recipiente con algún tapón en la alimentación que impida el avance del fluido de operación.

Para determinar la cantidad de mezcla de reacción albergada en el interior de los tubos hay que recurrir al concepto de porosidad. El número de tubos se ha determinado, como se ha visto en apartados anteriores, como el volumen necesario para albergar la masa de catalizador que permite la operación en el régimen óptimo. Sin embargo, el lecho catalítico no está íntegramente compuesto por *pellets* de catalizador, sino que existen huecos vacíos entre ellos que permiten el avance del fluido de operación. Bajo estas consideraciones, se determina el caudal de descarga a través de la válvula de alivio; los resultados obtenidos se recogen en la tabla 41.

Tabla 41: Determinación del caudal de alivio

Parámetro	Valor
Volumen lecho catalítico (m ³)	13.68
Porosidad	0.4
Volumen mezcla reaccionante (m ³)	5.47
Densidad media mezcla (kg/m ³)	19.75
Caudal de descarga (kg/h)	1298

Al tratarse del alivio de una corriente gaseosa, se debe comprobar la posibilidad de que se alcance el flujo crítico, a partir del cual el flujo que circularía a través de la válvula sería máximo independientemente de la diferencia de presiones. Para el dimensionamiento, se acude al punto 3.6 de la norma relativo al alivio de gases y/o vapores. A partir de la siguiente expresión se determina el tipo de flujo:

$$\frac{P_{crítica}}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (132)$$

en donde P_1 es la presión de tarado (5% superior a la presión de operación) y γ es el *ratio* entre los calores específicos de la disolución, que se consultan para la mezcla de reacción empleando un simulador de procesos. Así, si la presión de salida de reactor es menor o igual que la presión crítica se habla de flujo crítico. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 42.

Tabla 42: Cálculo de la presión crítica de flujo para determinar el régimen del mismo

Parámetro	Valor
P_1 (bar)	20
γ	1.11
$P_{crítica}$ (bar)	12.23

Dado que la presión aguas abajo del orificio (19.8 bar, teniendo en cuenta la caída de presión que experimenta la mezcla de reacción en su circulación a través del lecho catalítico) es mayor que la presión crítica de flujo, se establece que se está en un régimen de flujo subcrítico al que le corresponde la siguiente expresión para el cálculo del área según el apartado 3.6.3 de la normativa empleada:

$$A = \frac{17.9 \cdot W}{F_2 \cdot K_d \cdot K_c} \cdot \sqrt{\frac{z \cdot T}{M_m \cdot P_1 \cdot (P_1 - P_2)}} \quad (133)$$

en donde W hace referencia al caudal de alivio a través de la válvula (kg/h), F_2 es un coeficiente relativo al flujo subcrítico, K_d es el coeficiente efectivo de descarga (que en este caso asume un valor de 0.975 ya que el alivio de presión se lleva a cabo empleando una válvula y no un disco de ruptura), K_c es un factor que tiene en cuenta la combinación de la válvula de alivio con un disco de ruptura (en este caso se considera la instalación también de un disco de ruptura, por lo que este factor empírico asume un valor de 0.9), z es el factor de compresibilidad de la mezcla de reacción (que se introduce para tener en cuenta la desviación con respecto al comportamiento ideal del fluido de operación), T es la temperatura absoluta de alivio, M es la masa molecular media de la mezcla de reacción, P_1 es la presión de tarado en kPaa (que se define como un 5% superior a la presión de operación y un 5% inferior a la presión de diseño o MAWP) y P_2 es la presión de descarga, o *backpressure*, también definida en kPaa.

La definición del factor que tiene en cuenta el flujo crítico depende de dos relaciones: primeramente, entre la presión de tarado y la presión de descarga (r) y después la razón entre los calores específicos (k en la figura siguiente, Y según la nomenclatura utilizada a lo largo de este Anexo II). La propia normativa API adjunta una gráfica, presentada en la figura 28, donde se puede leer gráficamente el valor correspondiente:

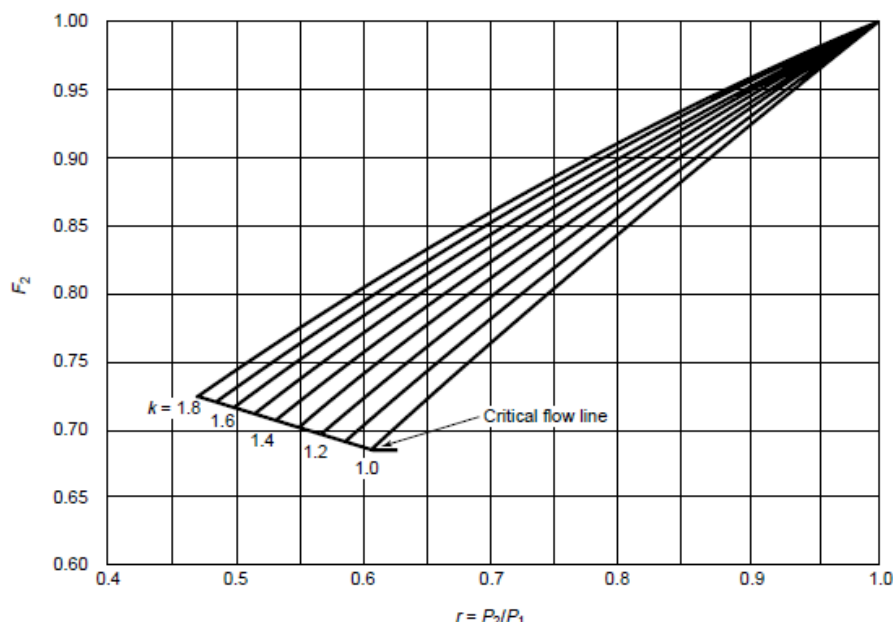


Figura 28: Valor de K_d para el caso de flujo subcrítico (API 520)

Sin embargo, si se desea una evaluación del factor K_d con mayor precisión, es recomendable acudir a expresiones analíticas, como la que se presenta a continuación:

$$F_2 = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) \cdot r^{2/\gamma} \cdot \left(\frac{1 - r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1 - r}\right)} \quad (134)$$

Los datos empleados para el dimensionamiento de la válvula de alivio, así como los resultados, se recogen en la tabla 43.

Tabla 43: Cálculos necesarios para el diseño de la válvula de alivio

Parámetro	Valor
F_2	0.107
K_d	0.975
K_c	0.9
z	1
T (K)	493.15
P_1 (kPaa)	2100
P_2 (kPaa)	100
M_m (kg/kmol)	61.52
$A_{\text{válvula}}$ (mm ²)	341.98

Según los estándares de la normativa API 526 para válvulas de alivio de acero con bridas, se selecciona una válvula con un orificio del tipo G cuya superficie estandarizada es de 398 mm².

3. Dimensionamiento básico del resto de equipamiento

Como se indica en el punto introductorio de este Anexo II, en este apartado final se realiza el *diseño* básico del resto del equipamiento presente en la planta de producción de acetato de etilo. El dimensionamiento se dirigirá hacia la consecución del parámetro de diseño S presentado en la Tabla 1 del documento V, conocido como presupuesto; la información de partida se extraerá del Anexo I. Balances de materia y energía.

3.1 Diámetro de las conducciones

Si la fuerza impulsora para conducir un fluido a través de una conducción es causada por una diferencia de presión o por cuestiones gravitatorias, el diámetro más pequeño de tubería que garantiza el caudal requerido es el usado normalmente. Por ello, la elección del diámetro de las conducciones se basa en la heurística teniendo en cuenta las velocidades típicas para líquidos y gases que se presentan en la tabla 44.

Tabla 44: Velocidades típicas en conducciones para diferentes tipos de fluidos (Sinnott)

Características del fluido	Velocidad típica en conducción (m/s)
Líquidos	1-3
Gases y/o vapores	15-30
Vapor de alta presión (>8 bar)	30-60

En el supuesto de que el fluido tenga que ser bombeado a través de la conducción, el tamaño -diámetro- de la conducción debe ser aquel que minimice el coste total anualizado, que depende de dos factores principales: el dinero a invertir para una línea de tuberías aumenta con el diámetro mientras que los costes de bombeo disminuyen con diámetros crecientes. Bajo esta consideración, se desarrolla la siguiente expresión para deducir el diámetro óptimo (en base económica) de las conducciones de una determinada planta:

$$D_{opt} = 0.363 \cdot q^{0.45} \cdot \rho^{0.13} \quad (3.1)$$

en donde q hace referencia al caudal volumétrico (en m^3/s) que circula a través de una tubería y ρ a la densidad (en kg/m^3) del fluido en cuestión. Esta expresión se utiliza para aquellos diámetros superiores a 1 pulgada (20.54 mm); en el caso opuesto, la ecuación que se utiliza para determinar el diámetro óptimo económico es:

$$D_{opt} = 0.49 \cdot q^{0.49} \cdot \rho^{0.14} \quad (3.2)$$

Bajo la consideración de la información presentada en la tabla 44 y en las ecuaciones 3.1 y 3.2 se deduce el diámetro de conducción para cada una de las corrientes que conforman el global de la planta de producción de acetato de etilo; en base al valor obtenido se acude a tamaños estandarizados de tuberías para escoger el inmediatamente superior. El siguiente paso consiste en comprobar que la cédula normalizada de la conducción elegida es capaz de resistir la presión interna así como tolerancias a la corrosión y erosión, supuestas de 2 mm al no trabajar con sustancias corrosivas.

Las tuberías de proceso son habitualmente consideradas como cilindros finos; el código ASME B31.3 proporciona la siguiente expresión para deducir el espesor de la pared:

$$t_{cond} = \frac{P \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P \cdot \gamma)} \quad (3.3)$$

en donde P es la presión del fluido que circula a través de la conducción sobredimensionada un 10%, D_0 el diámetro externo de la tubería (estandarizado, en función del diámetro interno y de la cédula escogida), S es la resistencia a la tracción del material seleccionado para la construcción de las tuberías (acero al carbono de baja aleación ASTM A213 grado T22), E asume un significado parecido al asumido en las ecuaciones 108-110 del presente anexo y γ es un coeficiente de temperatura; al tratarse de un acero de baja aleación donde se trabaja a temperaturas inferiores a 500°C asume un valor de 0.4.

Asimismo, el diámetro seleccionado ha de proporcionar una caída de presión por unidad de longitud aceptable; esta ΔP debido a la fricción es función del caudal, de la densidad y viscosidad del fluido y de la rugosidad y longitud de las conducciones según la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta P}{L} = 8 \cdot j_f \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2 \cdot D_i} \quad (3.4)$$

en donde el factor de fricción j_f se lee directamente en la figura 29 en función del Reynolds (*ratio* entre las fuerzas inerciales, contempladas como el producto de densidad, velocidad y diámetro de conducción y fuerzas viscosas definida como la viscosidad dinámica) y de la rugosidad relativa (cociente ε/D , siendo la rugosidad del acero al carbono de baja aleación de 4.6×10^{-5} metros).

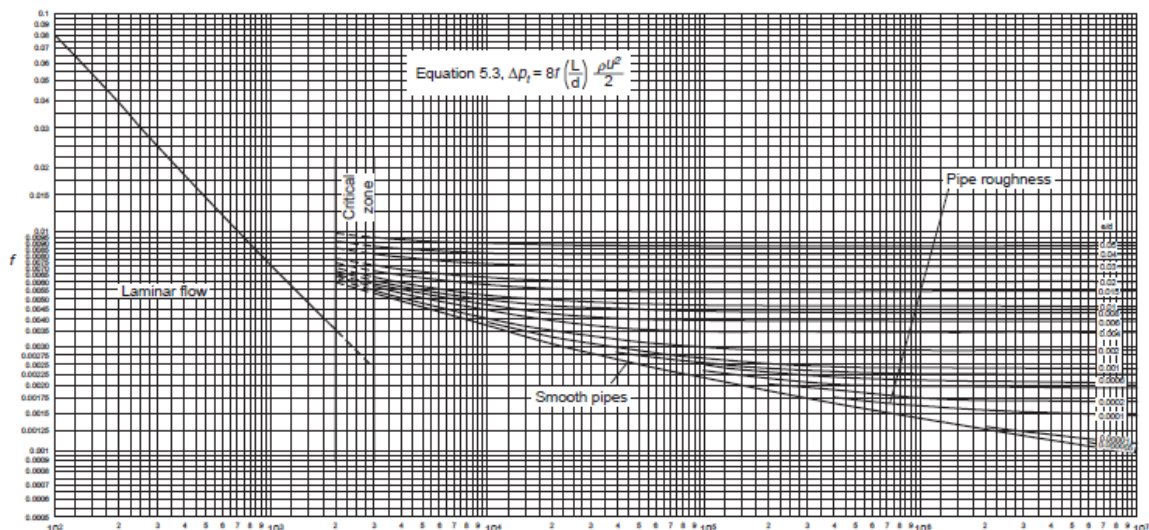


Figura 29: Factor de fricción j_f para determinación de caída de presión en conducciones (Sinnott)

Los valores de caída de presión asumibles como correctos se presentan en la tabla 45; las heurísticas no aplican a las líneas por las que fluye líquido iónico en régimen laminar, de ahí que no se calcule la caída de presión para estos casos.

Tabla 45: Caídas de presión permisibles para conducciones (Sinnott)

Características del fluido	Caída de presión aceptable (Pa/m)
Líquidos	500
Gases y/o vapores	50
Vapor de alta presión (>8 bar)	0.02% de la presión de línea

Los resultados obtenidos (diámetro estandarizado seleccionado así como la cédula de la tubería, velocidad del fluido en su trasiego y caída de presión por unidad de longitud) se presentan en la tabla 46.

Tabla 46: Diámetros seleccionados para el flujo de fluidos (Saylor Academy)

Corriente	D _o (mm)	D _i (mm)	Cédula	u (m/s)	ΔP/L (Pa/m)
1	88.9	58.5	XXS	0.90	131.6
2	88.9	73.7	XS	0.87	89.1
3	88.9	73.7	XS	0.87	88.8
4	88.9	77.9	40	1.03	97.1
5	114.3	97.1	XS	16.00	585.7
6	114.3	102.3	40	15.84	550.9
7	141.3	115.9	120	16.49	394.3
8	141.3	109.5	160	15.08	427.7
9	119.1	74.7	XXS	0.83	133.2
10	88.9	58.5	XXS	15.54	113.3
11	88.9	73.7	XS	0.80	130.9
12	88.9	73.7	XS	0.81	131.5
13	26.67	20.93	40	0.54	-
14	88.9	58.5	XXS	0.81	149.1
15	60.3	49.3	XS	0.80	234.7
16	60.3	38.1	XXS	4.87	-
17	406.4	398	5	10.42	1.73
18	26.67	20.93	40	0.54	-
19	26.67	20.93	40	0.54	-
20	60.3	49.3	XS	0.71	93.2
21	60.3	49.3	XS	0.71	93.7
22	60.3	49.3	XS	0.72	101.1
23	21.34	6.4	XXS	0.51	438.3
24	21.34	11.78	160	0.67	471.9
25	60.3	54.7	10	0.91	136.2

en donde se puede observar que los diámetros escogidos cumplen de manera adecuada las heurísticas introducidas para su diseño, además de garantizar el diseño más económico posible en base a lo postulado por las ecuaciones 3.1 y 3.2.

3.2 Bombas centrífugas

Con el objetivo de desplazarse de un punto a otro que se encuentra a mayor presión, un fluido precisa de un aporte de energía del exterior. Esta energía debe ser mayor que la del punto final teniendo en cuenta que durante el desplazamiento una fracción de ella se va a perder en forma de rozamiento.

En función del fluido que se desea impulsar cabe diferenciar entre líquidos (bombas centrífugas) o ventiladores, soplantes y compresores (para gases y/o vapores); la diferencia entre los tres elementos de impulsión para fluidos gaseosos está en su estructura física, lo que se traduce en las distintas presiones que son capaces de generar.

Para el diseño de una bomba centrífuga es necesario aplicar un balance de energía mecánica, resumido en la ecuación de Bernouilli para el flujo de fluidos incompresibles. Los líquidos responden a esta clasificación dado que un cambio en la presión a la que están sometidos no implica un cambio de volumen (y consecuentemente de densidad); para explicar esto hay que acudir a conceptos de termodinámica básica.

Para una corriente de fluido en estado líquido un cambio de presión no influye en su entalpía; para demostrar esto se acude a la siguiente definición:

$$dH = TdS + VdP \quad (3.5)$$

que no es más que la definición de entalpía. Para una variación de presión se llega a:

$$\frac{dH}{dP} = V \quad (3.6)$$

bajo la suposición de entropía constante. Entonces, para un fluido incompresible vemos que una variación de la presión responde a un volumen constante. La ecuación de Bernouilli atiende a la energía requerida por unidad de masa:

$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)} + g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{P_1 - P_2}{\rho} + W - \sum F_{roz} = 0 \quad (3.7)$$

en donde se tiene en cuenta la energía cinética (si el diámetro de la conducción no cambia se considera igual velocidad en los puntos 1 y 2 en los cuales se aplica el balance), la energía potencial gravitatoria (se considera un balance con el punto 1 en la línea de succión de la bomba y el punto 2 en la línea de descarga, por lo que la diferencia de alturas se asume como cero), la energía debido al cambio de presión, la energía comunicada por un elemento de impulsión y las pérdidas debido a fricción con la conducción, que dependen mayoritariamente del diámetro y rugosidad de la tubería.

En la ecuación anterior, el parámetro α considera el régimen de flujo (adopta un valor de 1 para regímenes turbulentos, $Re > 4000$, y de 0.5 para regímenes laminares, $Re < 2100$). El único parámetro que no se obtiene por sustitución directa de su valor es el que tiene en cuenta las pérdidas por rozamiento, que depende del factor de fricción de Darcy según la siguiente relación:

$$\sum F_{roz} = f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \quad (3.8)$$

en donde el factor de fricción de Darcy se consigue mediante la correlación analítica de Swamee-Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{1}{3.7 \cdot D/\varepsilon} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (3.9)$$

Para aquellas bombas destinadas a aumentar la presión del fluido de manera sustancial, la P-101 y la P-401, el balance de energía mecánica considerado responde a la siguiente forma puesto que se trata de un dimensionamiento básico, en J/kg:

$$W = \frac{P_2 - P_1}{\rho} \quad (3.10)$$

La potencia útil para desplazar el fluido dependerá, como es lógico, del caudal de fluido que tenga que impulsar:

$$P_{\text{útil}} = W \cdot v_o \cdot \rho \quad (3.11)$$

Suponiendo una eficiencia adiabática de bombeo del 75% (valor habitual para las bombas centrífugas utilizadas en el ámbito industrial), se tiene la potencia que debe proporcionar el elemento de impulsión al fluido para conseguir el propósito determinado:

$$P_{freno} = \frac{P_{\text{útil}}}{\eta} = S \quad (3.12)$$

Los datos empleados, así como los resultados obtenidos, para la bomba centrífuga P-101 (la de repuesto B responde al mismo criterio de dimensionamiento) se recogen a continuación en la tabla 47.

Tabla 47: Determinación del parámetro S para presupuestación de bombas centrífugas P-101 A/B

Parámetro	Valor
P ₁ (Pa)	100000
P ₂ (Pa)	2060000
ρ (kg/m ³)	791.8
W (J/kg)	2475.4
m (kg/s)	2.92
S (kW)	9.65

De manera análoga, los datos necesarios para el cálculo de la potencia de la bomba P-402 (previa a la purificación de reciclo) introducida bajo la justificación de operar esta columna de destilación T-402 a presión atmosférica, se recogen en la tabla 48.

Tabla 48: Parámetro de diseño S para presupuestación bomba centrífuga P-401 A/B

Parámetro	Valor
P_1 (Pa)	50000
P_2 (Pa)	100000
ρ (kg/m ³)	754.7
W (J/kg)	79.5
m (kg/s)	1.03
S (kW)	0.11

Dado que se requiere muy poca potencia para este requerimiento de impulsión, las bombas centrífugas P-401 A/B no se tienen en cuenta con propósitos presupuestarios. Para el caso de las bombas centrífugas introducidas con el propósito de vencer las otras cargas presentadas en la ecuación 3.7 se tiene en cuenta la información presentada en el diagrama de implantación en tanto a distancias entre equipos. En la tabla 49 se presentan los resultados de la potencia de P-402, P-403 y P-404.

Tabla 49: Requerimientos de potencia bombas centrífugas P-402, P-403 y P-404

Parámetro	P-402	P-403	P-404
Reynolds fluido	103.9	60636.1	145409.9
z_1 (m)	0.5	0.5	0.5
z_2 (m)	18	2.5	6
P_1 (Pa)	50000	100000	90000
P_2 (Pa)	100000	100000	100000
f_{Darcy}	0.62	0.023	0.019
L (m)	41.15	31.04	12.19
L_{eq} (m)	8.23	6.21	2.44
L_{total} (m)	49.38	37.25	14.62
ΣF_{roz} (J/kg)	210.6	4.60	1.51
W (J/kg)	422.6	24.22	67.45
$P_{\text{útil}}$ (W)	97.07	24.57	122.31
Eficiencia impulsión (%)	75	75	75
S (kW)	0.13	0.04	0.17

en donde la longitud de los elementos de las conducciones (véase codos, ángulos o paso por válvulas) se computa como el 20% de la longitud de los tramos rectos. Asimismo, el factor de fricción de Darcy para la bomba centrífuga P-402 no se calcula aplicando la ecuación de Swamee-Jain (3.9) debido a las características laminares del flujo, por lo que se calcula aplicando la siguiente correlación:

$$f_{Darcy} = \frac{64}{Re} \quad (3.13)$$

Debido a los bajos valores de potencia obtenidos, las bombas presentadas en la tabla 49 no se tienen en cuenta para presupuestación, al igual que la P-401.

3.3 Intercambiadores de calor

Para la determinación del área de intercambio de calor (parámetro S en presupuestación para los intercambiadores de calor) se acude a la ecuación de diseño de un intercambiador de calor:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{mlog} \cdot F_t \quad (3.14)$$

De la anterior expresión, los valores de U se pueden leer del Nomograma de Frank presentado en la figura 10 del presente Anexo o en tablas, como la mostrada en la tabla 50, que recogen los valores más habituales en función de las características que presenten el fluido caliente y el fluido frío, que es la metodología que se sigue para el dimensionamiento básico.

Tabla 50: Valores típicos del coeficiente integral de transmisión de calor (Sinnott)

Hot Fluid	Cold Fluid	U (W/m ² C)
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50
<i>Coolers</i>		
Organic solvents	Water	250–750
Light oils	Water	350–900
Heavy oils	Water	60–300
Gases	Water	20–300
Organic solvents	Brine	150–500
Water	Brine	600–1200
Gases	Brine	15–250
<i>Heaters</i>		
Steam	Water	1500–4000
Steam	Organic solvents	500–1000
Steam	Light oils	300–900
Steam	Heavy oils	60–450
Steam	Gases	30–300
Dowtherm	Heavy oils	50–300
Dowtherm	Gases	20–200
Flue gases	Steam	30–100
Flue	Hydrocarbon vapors	30–100
<i>Condensers</i>		
Aqueous vapors	Water	1000–1500
Organic vapors	Water	700–1000
Organics (some noncondensables)	Water	500–700
Vacuum condensers	Water	200–500
<i>Vaporizers</i>		
Steam	Aqueous solutions	1000–1500
Steam	Light organics	900–1200
Steam	Heavy organics	600–900

Para optimizar la operación de transmisión de calor se apuesta por un régimen de flujo a contracorriente, con el fin de mantener el gradiente de temperaturas lo más elevado posible (a mayor fuerza impulsora, mayor transferencia de calor). Para el diseño de intercambiadores de calor de carcasa y tubos que operan en el régimen a contracorriente, la diferencia de temperaturas (diferente en cada punto del reactor) se considera empleando la siguiente expresión:

$$\Delta T_{mlog} = \frac{(T_{c,ent} - T_{f,sal}) - (T_{c,sal} - T_{f,ent})}{\ln \frac{(T_{c,ent} - T_{f,sal})}{(T_{c,sal} - T_{f,ent})}} \quad (3.15)$$

en donde $T_{c,i}$ hace referencia a la temperatura del fluido caliente en el extremo i , que circula por tubos, (bien entrada o salida) y los $T_{f,i}$ designan las temperaturas del fluido frío en el extremo i , que en este caso circulará por el lado de carcasa.

La relación para la diferencia de temperaturas media logarítmica desarrollada con anterioridad únicamente se limita a los intercambiadores de flujo paralelo o contracorriente. También se han desarrollado expresiones similares para los intercambiadores de calor de flujo cruzado y de carcasa y tubos de pasos múltiples, pero las relaciones resultantes son demasiado complicadas debido a las complejas condiciones de flujo.

En estos casos resulta conveniente introducir el factor de corrección F_t , que depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes de fluido caliente y frío. Para un intercambiador de flujo cruzado o de múltiples pasos el factor de corrección es menor o igual que la unidad (el valor de 1 se corresponde con el régimen a contracorriente); el factor de corrección es por lo tanto una medida de la desviación de la ΔT_{mlog} con respecto a los valores correspondientes para el caso a contraflujo. Sin embargo, no cualquier valor del factor de corrección es coherente; con propósitos de diseño ha de ser mayor de 0.75 y preferiblemente superior a 0.85.

Para su evaluación se pueden utilizar correlaciones empíricas, mas el procedimiento habitual implica el uso de gráficas como la que se presenta en la figura 30, para un intercambiador de un paso por carcasa y un múltiplo de 2 (2, 4, 6...) pasos por tubos.

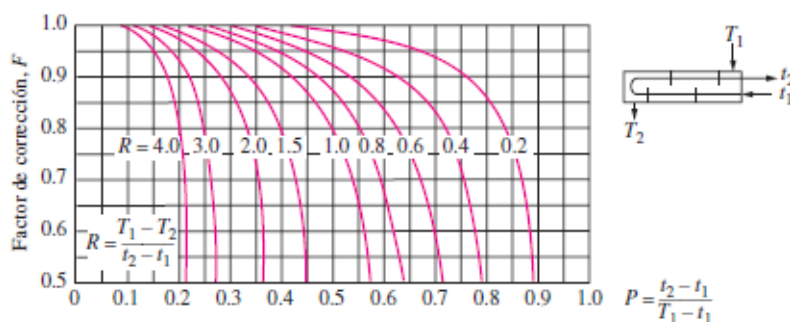


Figura 30: Correlación gráfica para determinar el factor de corrección F_t (Çengel)

Sin embargo, bajo la consideración de dimensionamiento básico no se considerará la utilización de factores de corrección, ya que el resultado no varía en exceso y el propósito presupuestario fácilmente puede asimilar el pequeño error que se comete al despreciar estos valores. Además, mucho de los intercambiadores de calor introducidos en la planta implican un cambio de fase (evaporadores con vapor condensante o condensadores con agua de enfriamiento), cuyo factor de corrección es de 1.

Los valores de calor transferido se indican en el Anexo I. Balances de materia y energía, donde además se detalla el procedimiento de cálculo y las temperaturas involucradas en cada caso, tanto para el fluido de operación como para el fluido de servicio. Las áreas

necesarias para la transmisión de calor en los diferentes intercambiadores de calor, calculadas según el procedimiento aquí explicitado, se resumen en la tabla 51.

Tabla 51: Parámetro de diseño S para presupuestación de intercambiadores de calor

Intercambiador de calor	Parámetro S (m ²)
Carcasa y tubos E-101	33.7
Evaporador <i>kettle</i> E-102	72.6
Carcasa y tubos E-103	4.7
Carcasa y tubos E-201 (fluido térmico)	55.5
Carcasa y tubos E-301	87.7
Condensador T-402	24.3
Calderín de fondos T-402	29.2
Condensador T-403	30.2
Calderín de fondos T-403	4.6

3.4 Tanques flash

Para los recipientes donde se lleva a cabo una evaporación instantánea el parámetro de diseño utilizado es la masa de carcasa, que se determina a partir del diámetro del recipiente y de su espesor, por lo que es necesario llevar a cabo una estimación del diámetro basándose en un criterio realista y después un estudio básico de fuerzas que derive en un diseño mecánico que permita determinar el espesor según la ecuación presentada por el código de diseño utilizado (ASME Sección VIII División I para recipientes a presión de pared delgada).

Para los depósitos flash el procedimiento habitual de dimensionamiento primario consiste en suponer un tiempo de residencia que permita una separación efectiva de las fases gaseosa y líquida (por cabezas y colas del flash respectivamente); la heurística dice que 15 segundos deberían basar para este propósito:

$$t_r = \frac{V}{v_o} \quad (3.16)$$

en donde v_o es el caudal volumétrico de entrada al depósito flash, que se obtiene a partir del flujo másico (acudir al Anexo I. Balances de materia y de energía) y de la densidad, extraída en este caso del simulador de procesos Hysys.

Una vez estipulado el volumen necesario para la separación efectiva de las fases se supone una geometría cilíndrica, con lo que el cálculo del diámetro del recipiente es trivial:

$$V = \pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot L \quad (3.17)$$

La relación entre la longitud y el diámetro interno de la carcasa se establece como 1:1 para diámetros inferiores a 2 m y de 3:1 para diámetros superiores a estos dos metros.

Una vez estipulado el diámetro se calcula el espesor según las directrices del código de diseño empleado, análogo al cálculo de espesores desempeñado para el reactor catalítico heterogéneo:

$$t = \frac{P_i \cdot d_i}{2 \cdot S \cdot E - 1.2 \cdot P_i} \quad (3.18)$$

en donde S se corresponde con la resistencia a la tensión máxima especificada para el material de construcción seleccionado (acero de baja aleación ASTM A387 Grado 22, idéntico al material de la carcasa del reactor) y E es la eficiencia de la soldadura; en este caso, puesto que no se trata de una etapa tan crítica como la de reacción se justifica un factor de eficacia de 0.85, con un grado de examinación radiográfica puntual.

Si el espesor calculado es inferior al valor presentado en la tabla 28 de espesores mínimos para recipientes en función de su diámetro, se asume como el espesor necesario el valor tabulado.

En principio, la determinación del espesor para el recipiente flash V-301 (25 bar) y el V-401 (0.5 bar) debería ser diferente puesto que uno trabaja a gran presión interna mientras que otro opera a vacío, estando sujeto a presión externa. La metodología aquí presentada aplica de manera rigurosa al primer caso; en el caso de trabajar a vacío es importante tener en cuenta la presión crítica que causa pandeo, que es función del módulo de elasticidad de Young y de un coeficiente de colapso que es función de los anillos de refuerzo que unen las diferentes planchas metálicas que conforman la carcasa, de una determinada longitud y diámetro.

Sin embargo, si se desea realizar el cálculo riguroso -no es el objetivo de esta sección- hay que tener en cuenta que la máxima presión permisible en compresión no coincide con la máxima tensión permisible en tensión. El código ASME BPV Sección VIII División I Parte UG-28 debe ser consultado para realizar el diseño mecánico riguroso de recipientes sujetos a presión externa.

Una vez establecidos el diámetro y el espesor del recipiente a presión se calcula el volumen de metal necesario para satisfacer la aplicación determinada:

$$V_{metal} = \pi \cdot \frac{(d_i^2 + 2 \cdot t)^2}{4} \cdot L - \pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \cdot L \approx \pi \cdot d_i \cdot L \cdot t \quad (3.19)$$

que, mediante la aplicación de la densidad del material de construcción escogido ($\rho=7800 \text{ kg/m}^3$), permite estipular la masa de la carcasa del recipiente flash en cuestión. Así, para los dos tanques flash de los que dispone la planta de proceso se recogen los requerimientos másicos de la carcasa en la tabla 52.

Tabla 52: Parámetro de diseño S para presupuestación de depósitos flash

Tanque flash	Parámetro S (kg)
V-301	889.2
V-401	2700

3.5 Columnas de destilación

Para la presupuestación de las columnas de destilación será necesario inferir el diámetro de la columna en cuestión en base a otro criterio diferente al tiempo de residencia. En este caso, se emplea una metodología con una fuerte componente empírica a pesar de partir de los resultados presentados en el balance de materia externo a la columna.

En el presente trabajo, el diseño riguroso se ha aplicado al reactor de deshidrogenación catalítica, por lo que para obtener los datos de las separaciones se recurre al simulador de proceso Hysys, donde primeramente se realiza una simulación aproximada y posteriormente una rigurosa. Los datos proporcionados, en tanto a los flujos de corrientes de destilado y de colas, así como sus propiedades termodinámicas se basan en su totalidad en los resultados presentados por el simulador.

El procedimiento comienza con la determinación de los flujos de líquido y de vapor en las dos secciones de la columna (rectificación y agotamiento) separadas por la entrada de la alimentación, considerando que los caudales no cambian en cada una de las secciones: es la consideración denominada por Lewis como CMO (*constant molar overflow*) y que implica que cada vez que se vaporiza un mol de líquido se condensa un mol de vapor. Esto ocurrirá siempre que:

- La columna sea adiabática, es decir, que no tenga pérdidas de energía al exterior.
- Los cambios en los calores sensibles sean pequeños en comparación con los calores latentes.
- La entalpía de vaporización por mol sea constante, o lo que es lo mismo, que no dependa de la concentración.

Por ello, una vez determinado el caudal de destilado se puede determinar el caudal de líquido y de vapor en la sección de rectificación a partir de la razón de reflujo (calculado con las dos ecuaciones de Underwood) con simples balances de materia.

$$L = R \cdot D \quad (3.20)$$

$$V = L + D = (R + 1) \cdot D \quad (3.21)$$

Además, como la alimentación se introduce a la temperatura de su punto de burbuja (condición de líquido saturado), los flujos de líquido y vapor en la sección de agotamiento son:

$$\bar{L} = L + q \cdot F \quad (3.22)$$

$$\bar{V} = V \quad (3.23)$$

donde q recoge las características termodinámicas de la corriente de alimentación ($q=1$ para líquido saturado). La obtención de las densidades como líquido y vapor en ambas secciones se realiza, como ya se ha indicado, con ayuda de Hysys. Una vez recopilada toda la información necesaria, se supone un espaciado entre platos de 0.5 m (habitual en la industria, enfoque heurístico) y comienza el procedimiento empírico.

El diámetro de la columna se estima en base a la condición de inundación (*flooding*), que fija el límite superior de la velocidad de vapor; una velocidad elevada de vapor será necesaria para conseguir altas turbulencias que generen una transferencia de materia eficaz. Por ello, la velocidad del vapor en el interior de la columna se considera como el 80% de aquella que causaría el fenómeno de inundación, que se estipula mediante la correlación empírica de Fair:

$$u_f = K_1 \cdot \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \quad (3.24)$$

en donde K_1 es el Coeficiente de Souders-Brown, que se refiere a la capacidad del vapor para moverse por el interior de la columna, que se lee en la figura 31.

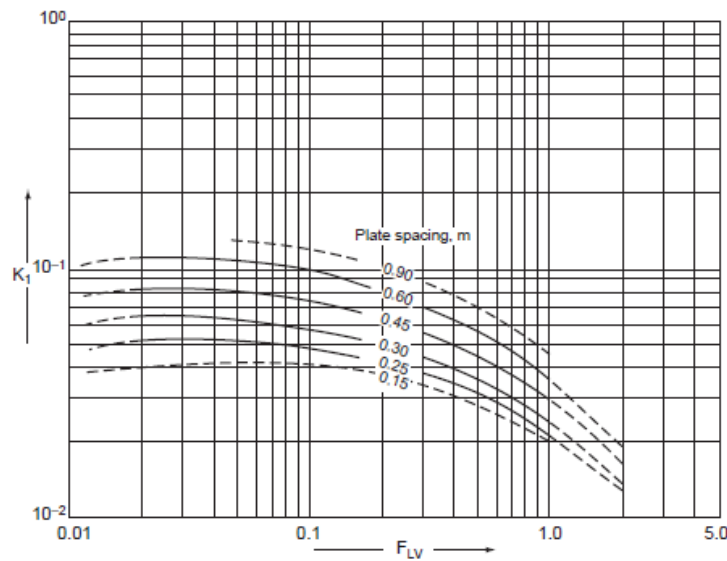


Figura 31: Determinación del Coeficiente de Souders-Brown para unas condiciones de flujo determinadas (Sinnott)

Es conveniente tener en cuenta que la aplicación de esta gráfica para la determinación del Coeficiente de Souders-Brown tiene una serie de limitaciones: el diámetro de los agujeros en el plato debe ser menor a 6.5 mm, la altura de rebosadero tiene que ser menor del 15% que el espaciado entre platos, el sistema debe ser poco espumoso (la cantidad de espumas en la superficie de película del líquido reduce la capacidad de movimiento de vapor dentro de la columna) y la relación entre el área de los orificios y el área activa (área de burbujeo) tiene que ser del 10%. Todos estos supuestos serán tenidos en cuenta en su respectivo momento.

La abscisa de entrada en la figura 29 es el parámetro de flujo, F_{LV} , que se define del siguiente modo:

$$F_{LV} = \frac{L}{V} \cdot \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_L}} \quad (3.25)$$

y que se calculará tanto para la sección de cabezas como para la de colas de la columna de destilación, con los flujos determinados en base másica.

Para calcular el diámetro de la columna se requiere un estimado del área neta: área de la sección transversal de la columna en la cual puede tener lugar la transferencia de materia, es decir, el plato sin tener en cuenta la bajante. Como una primera prueba, basta con asumir -siguiendo un enfoque heurístico- que el área de la bajante es el 12% de la sección transversal. Por ello, para que dimensionalmente se obtenga algo coherente, el área neta se calcula del siguiente modo bajo la condición de diseño de una velocidad de vapor del 80% a la correspondiente en situación de inundación:

$$A_n = \frac{V/\rho_v}{0.8 \cdot u_f} \quad (3.26)$$

siendo consecuentemente el área de la sección transversal de la columna:

$$A_c = \frac{A_n}{0.88} \quad (3.27)$$

Puesto que las columnas de destilación adoptan una sección circular (configuración cilíndrica vertical), la determinación del diámetro es sencilla:

$$A_c = \pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \quad (3.28)$$

Una vez determinado el diámetro de la columna, se dispone de la información que faltaba para calcular el espesor necesario, siguiendo la ecuación 3.13. Con el diámetro, el espesor y la altura (espaciamento entre platos, espesor de los platos de 5 mm, un metro por debajo del condensador y por encima del reboiler y 0.5 m extra para la instalación de la boquilla de la alimentación) se puede calcular el volumen de metal necesario para construir la carcasa, que considerando la densidad del material de construcción, permite calcular la masa necesaria -parámetro de dimensionamiento S para la presupuestación de recipientes a presión-. Los valores obtenidos se resumen a continuación en la tabla 53.

Tabla 53: Parámetro de diseño S para presupuestación (I) de columnas de destilación

Columna de destilación	Parámetro S (kg)
Torre de purificación de reciclo T-402	1240
Torre de purificación de producto T-403	500

Una vez determinada la masa de carcasa, es necesario considerar el coste asociado a los accesorios internos, que se centra principalmente en los platos que actúan como las etapas de contacto que posibilitarán la operación de separación, en las cuales el líquido fluye a través del plato en sentido transversal y el vapor fluye a través del mismo en sentido ascendente, posibilitando una especie de flujo cruzado que es el más empleado en las columnas de destilación a nivel industrial. El líquido se transfiere de plato a plato

a través de unos canales verticales que reciben el nombre de bajantes (*downcomers*). Una masa estática de líquida (piscina) se mantiene constantemente encima de cada bandeja empleando un rebosadero que actúa de presa.

Existen tres morfologías de plato diferentes, clasificadas en base al método que emplea para facilitar el contacto entre líquido y vapor:

- Plato perforado: es el tipo más simple de plato para el flujo cruzado. El vapor asciende a través del plato por unos orificios o perforaciones y el líquido se retiene en la bandeja debido al empuje de este vapor ascendente. No hay un sello efectivo en estos agujeros, y si el flujo de vapor es lo suficientemente pequeño el líquido puede caer en forma de gotas a través de los agujeros, reduciendo la eficiencia del plato y por consiguiente de la columna. Se representa en la figura 32.
- Platos de campana: contienen pequeñas campanas con una pequeña tubería a partir de la cual el vapor asciende. Este tipo de plato es el más empleado en la industria tradicionalmente y numerosos diseños revolucionarios se han llevado a cabo; el más destacado, un mecanismo que asegura que el nivel de líquido se mantiene sobre el plato independientemente del flujo de vapor.

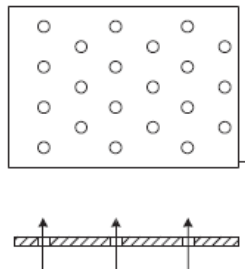


Figura 32: Representación esquemática de platos perforados (Sinnott)

- Plato de válvulas: son platos perforados con agujeros de gran diámetro que están cubiertos por salientes móviles, que ascienden a medida que el vapor fluye. Ya que el área para el flujo de vapor varía con el propio flujo, los platos de válvula pueden ser empleados a regímenes de vapor más bajos que los perforados, mismo llegando a cerrar las válvulas a caudales de vapor muy bajos.

La selección del tipo de plato depende de numerosos parámetros, siendo los más destacados el coste, la capacidad, el rango de operaciones, la eficiencia y la caída de presión. Los platos perforados son los más económicos y los que más capacidad proporcionan (referida en tanto al diámetro de la columna que se requiere para un determinado flujo). En cuanto al rango de operación, son los menos flexibles (no son fiables para valores de *turndown* muy elevados); no obstante, para la mayor parte de las aplicaciones industriales son perfectamente válidos. También son los que menor caída de presión producen. Es por este motivo por el que el diseño hidráulico de los platos se va a basar en una morfología del tipo plato perforado.

La función de estos platos perforados como etapa de contacto debe ser suministrar un buen contacto líquido-vapor, suministrar un tiempo de retención suficiente del líquido para así aumentar la transferencia de materia, tener un área suficiente y un espaciado tal que el arrastre de líquido sea asumible (evitar inundación de la columna, *flooding*) y la pérdida de carga no sea muy elevada. Además, debe poseer un área de bajante adecuada para que el líquido fluya libremente de plato a plato.

La operación satisfactoria del plato perforado como etapa de contacto solamente se alcanzará en un rango limitado de flujos de líquido y vapor. El límite superior del flujo de vapor viene dado por la condición de inundación de la columna: en este caso hay una disminución brusca en la eficiencia del plato y un incremento elevado en la caída de presión. Esta inundación se produce por el excesivo arrastre de líquido debido a un flujo muy elevado de vapor o por la saturación de líquido en la sección de la bajante. El límite inferior viene dado por el goteo (*weeping*): este fenómeno ocurre cuando el flujo de vapor es insuficiente como para mantener el nivel de líquido en el plato, cayendo a las bandejas inferiores. El diseño hidráulico del plato que se realizará a continuación tendrá por lo tanto la finalidad de garantizar una operación fiable con una eficacia satisfactoria.

En este caso, se consideran platos perforados puesto que las torres de purificación y la columna de destilación azeotrópica no entrañan una gran dificultad. El parámetro de diseño para los platos es el diámetro de la columna; hay que tener en cuenta asimismo que el precio obtenido con la expresión derivada de la ley de la potencia (ecuación 1 en el Presupuesto) se refiere a un único plato. En la tabla 54 se recoge el número de platos de cada columna, así como el parámetro de diseño para su presupuestación:

Tabla 54: Parámetro de diseño *S* para presupuestación (II) de columnas de destilación

Columna de destilación	Número de platos	Parámetro <i>S</i> (m)
T-402	20	0.75
T-403	10	0.50

Asimismo, se incluyen los condensadores totales de la corriente de cabezas y los calderines de fondos parciales, cuyos parámetros de diseño ya se han especificado en el apartado de dimensionado básico de intercambiadores de calor.

Finalmente para la columna de destilación azeotrópica T-401, teniendo en cuenta que trabaja con un caudal que es la suma de los caudales de trabajo de la T-402 y de la T-403, que incluye un líquido iónico como *entrainer* y contiene unas 30 etapas de contacto, se presupuesta como el doble de los costes asociados a la suma de ambas torres de purificación.

Según lo consultado en la bibliografía, se acepta como válida una relación entre la altura y el diámetro oscilante entre 20 y 30. Para el dimensionamiento básico realizado en este apartado se cumple este criterio.

3.6 Compresores

Dadas las características del flujo (caudal y densidad) y las condiciones de operación (presión y temperatura) se justifica el empleo de un compresor recíprocante en vez de uno que consiga la impulsión del fluido gaseoso por técnicas centrífugas. Se dispone por lo tanto de una cámara con un volumen fijo y de un pistón que comprime el volumen alojado en el interior, aumentando consecuentemente la presión.

Como se ha estipulado en el Anexo I. Balances de materia y de energía, se trata de una operación adiabática en donde el trabajo necesario (en términos de energía por unidad de masa) para compresión se estipula a partir de la siguiente expresión:

$$W_{teórico} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{R \cdot T_{entrada}}{M_m} \cdot \left[\left(\frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3.29)$$

Para conocer la potencia necesaria, basta con multiplicar el trabajo teórico por el caudal másico a impulsar; finalmente, se considera una eficacia de compresión adiabática del 75%, infiriendo la potencia que ha de transferir el compresor al gas para aumentar su presión en la relación estipulada. El parámetro de diseño S para la presupuestación del compresor es 110.84 kW.

4. Bibliografía

El estándar que se utilizará para indicar las referencias bibliográficas del Anexo II. Cálculos Justificativos seguirá las directrices establecidas por la norma ISO 690:2010. No obstante, a diferencia de en la Memoria, no se redactan las citas en el seno del texto mediante el método numérico, sino que se indican todas las referencias empleadas a continuación por orden alfabético.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (I). *Recommended Practice API Standard 520 about Sizing, Selection and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries. Part I: Sizing and Selection*. [sitio web] Publicado en enero 2000 [consultado en mayo 2018] Disponible online en: <http://unrn.edu.ar/blogs/mantenimiento-industrial-alto-valle/files/2009/06/api-rp-520-1.pdf>

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (II). *Recommended Practice API Standard 526 about Flanged Steel Pressure Relief Valves*. [sitio web] Publicado en junio 2002 [consultado en mayo 2018] Disponible online en: <https://is.gd/RiuNBQ>

ASHBY M.F. *Materials selection in Mechanical Design*. 4ª edición. Amsterdam, Países Bajos: Ed. Elsevier, 2011, ISBN: 9781856176637.

CAROTENUTO G. *Innovative processes for the production of acetaldehyde, ethyl acetate and pure hydrogen by Ethanol*. 2011. Tesis de Doctorado in Scienze Chimiche, Universidad Federico II Napoli.

CAROTENUTO G, TESSER R, DI SERIO M, SANTACESARIA E. Kinetic study of ethanol dehydrogenation to ethyl acetate promoted by a copper/copper chromite based catalyst. *Catalysis Today*. 2013, volumen 203, pp. 202-210. DOI 10.1016/j.cattod.2012.02.054.

ÇENGEL Y, GHAJAR A. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. Capítulo 11: intercambiadores de calor. 4ª edición. México DF: Ed. McGraw-Hill, 2011, pp. 629-683. ISBN: 978-607-15-0540-8.

COLLEY, Stephen William. *Synthesis of ethyl ethanoate from ethanol by heterogeneous catalytic dehydrogenation, hydrogenation and purification*. 2002. Durham theses, Durham University. Disponible online en: <http://etheses.dur.ac.uk/4159/>.

CROWL D, LOUVAR J. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. Chapter 8: Introduction to Reliefs & Chapter 9: Relief Sizing. 2ª edición. New Jersey (USA): Ed. Prentice-Hall, 2002, pp. 353-428. ISBN: 0-13-018176-5

DAVIDSON T. *A simple and accurate method for calculating viscosity of gaseous mixtures*. Report of Investigations 9456/1993. United States, Department of the Interior, Bureau of Mines. Descargable online en: <https://bit.ly/2G4vnTa>

DOW CHEMICAL PRODUCT TECHNICAL DATA. *Dowtherm Q: Heat Transfer Fluid*. USA, 1997. Europe Form number: CH 153-041-E-697

FOGLER H.S. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 4ª edición. Naucalpán de Juárez, México: Ed. Pearson Educación, 2008, ISBN 10: 970-26-1198-9.

FROMENT G, BISCHOFF K. *Chemical reactor analysis and design*. 2ª edición. Londres, Reino Unido: Ed. John Wiley & Sons, 1990, ISBN: 0-471-51044-0.

HOUGEN O.A, WATSON K. *Chemical Process Principles: Part 3 about Kinetics and Catalysis*. 1ª edición. New York, USA: Ed. John Wiley & Sons, 1947, ISBN 10: 999-51-7933-4.

LEVENSPIEL O. *Ingeniería de las reacciones químicas*. 3ª edición. México DF, México: Ed. Limusa-Wiley, 2004, ISBN: 968-18-5860-3.

LILEY P, THOMSON G, FRIEND D, DAUBERT T, BUCK E. Physical and Chemical Data. En: PERRY R, GREEN D, MALONEY J. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7ª edición. New York: Ed McGraw-Hill, 1997, Sección 2, pp. 2/7-2/374. ISBN: 0-07-049841-5

MOTT R. *Mecánica de fluidos*. 6ª edición. México DF: Ed. Pearson Educación, 2006, ISBN: 970-26-0805-8.

PETERS M, TIMMERHAUS K. *Plant design and economics for chemical engineers*. Chapter 11: optimum design and design strategy. 4ª edición. Colorado, USA: Ed. McGraw-Hill, 1991, ISBN: 0-08-100871-3.

SANTACESARIA E, CAROTENUTO G, TESSER R, DI SERIO M. Ethanol dehydrogenation to ethyl acetate by using copper and copper chromite catalysts. *Chemical Engineering Journal*. 2012, volumen 179, pp. 209-220. DOI 10.1016/j.cej.2011.10.043.

SAYLOR ACADEMY. *Standard Pipe Sizes: a table of the most common standard sizes*. [sitio web, consultado en abril 2018]. Disponible online en: <https://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2011/07/ME303-4.1.1.pdf>

SINNOTT R, TOWLER G. *Chemical Engineering Design. Principles, practice and economics of plant and process design*. 1ª edición. San Diego, CA, USA: Ed. Elsevier, 2008, ISBN 13: 978-0-506-8423-1.

SMITH J, VAN NESS H, ABBOT M. *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. 5ª edición. México DF, México: Ed. McGraw-Hill, 1996, ISBN: 970-10-1333-6.

TISCAREÑO LECHUGA F. *ABC para comprender reactores químicos con multireacción*. 1ª edición. Universidad de Celaya, México: Ed. Reverté, 2008, ISBN: 9789686708769.

THE ENGINEERING TOOLBOX. *Pipe lenghts*. [sitio web, consultado en abril 2018]. Disponible online en: https://www.engineeringtoolbox.com/pipe-length-d_744.html

WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA. *Sphericity defined by Wadell*. [sitio web, consultado en abril 2018]. Disponible online en: <https://bit.ly/2KSqbW0>

WILSON A, ROPER C, ORIE K, FLETCHER B. Lukens Steel Company. Properties and Behavior of moderno A387 Cr-Mo Steels. *Serviceability of Petroleum, Process and Power Equipment*. ASME 1992, volumen 239, Lukens Steel Company (Coatesville, PA)

ANEXO III. CÓDIGOS IMPLEMENTADOS EN MATLAB

Contenido

1. Alcance	2
2. Función de construcción del sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales.....	3
3. Programa de resolución de los balances de materia y energía	5

1. Alcance

En este tercer anexo a la Memoria se adjuntan las líneas de código que se han implementado en el software Matlab® de la compañía MathWorks con el propósito de resolver numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales que modeliza matemáticamente el comportamiento del reactor, teniendo en cuenta los balances de materia a cada componente en términos molares y los balances de energía tanto a la mezcla reaccionante como al fluido calefactor expresados ambos como perfil de temperaturas.

Dado que el estudio cinético que ha auspiciado el diseño de este reactor catalítico heterogéneo proporciona las expresiones Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson de las leyes de velocidad en términos de masa de catalizador, la variable independiente en cada una de las ecuaciones diferenciales será W_{cat} (kg) con el fin de alcanzar coherencia dimensional en los cálculos realizados. La deducción de las diferentes ecuaciones algebraico-diferenciales que integran el sistema no lineal sin solución analítica ha sido realizada en el Anexo II. Cálculos Justificativos.

2. Función de construcción del sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales

Primeramente, se codifica una función que incorpore los datos cinéticos y termodinámicos de las reacciones que tienen lugar en el interior del reactor, así como los datos relativos a la transmisión de calor que tiene lugar con el fluido calefactor.

Como *input* se introduce un vector que contiene los flujos molares de los diferentes compuestos que integran la mezcla, que se relacionan con las presiones parciales mediante simples expresiones algebraicas, y las temperaturas de los dos fluidos y como salida se obtienen los cinco balances de materia y los dos balances de energía en la forma adecuada para que el software pueda resolverlo de manera numérica con posterioridad.

```
%El vector dzdW de salida de la función consistirá en los lados
derechos de las ecuaciones que conforman el sistema de ecuaciones
diferenciales: dFe, dFa, dFea, dFh2, dFo, dT y dTa con respecto a la
masa de catalizador, dW
function dzdW=disenoreactor(W,Y)
Y=[Y(1);Y(2);Y(3);Y(4);Y(5);Y(6);Y(7)];
%Se establece la relación entre los flujos molares de entrada (entrada
de la función) y las presiones parciales que rigen los modelos
cinéticos LHHW
Pt0=20; P(1)=Y(1)/sum(Y)*Pt0; P(2)=Y(2)/sum(Y)*Pt0; P(3)=Y(3)/sum(Y)*Pt0;
P(4)=Y(4)/sum(Y)*Pt0;
%Se introduce las expresiones de Arrhenius que modelizan las
constantes cinéticas en función de T (kmol/kg cat h bar^n)
k1=1.114e18*exp(-151670/(8.314*Y(6)));
k2=47566*exp(54182.8/(8.314*Y(6)));
k3=0.0011;
%Del mismo modo, a partir de los estudios realizados, se adjunta la
relación existente entre las constantes de equilibrio y T
Ke1=exp(16.5-9136.4/Y(6)); Ke2=exp(-4.79+4386/Y(6));
%Las constantes de equilibrio de adsorción se consideran constantes a
lo largo del rango de temperaturas que se alcanzan en el reactor
b1=10.2640; b2=97.1132; b3=40.6612; b4=2.5e-4;
%Las leyes de velocidad siguen un arreglo de Hougen-Watson (kmol/h
kgcat)
r1=(k1*b1*P(1)*(1-
(P(2)*P(4))/(P(1)*Ke1)))/(1+b1*P(1)+b2*P(2)+b4*P(4))^2;
r2=(k2*b1*P(1)*b2*P(2)*(1-
(P(3)*P(4))/(P(1)*P(2)*Ke2)))/(1+b1*P(1)+b2*P(2)+b3*P(3)+b4*P(4))^2;
r3=k3*P(2)^2;

%Una vez se ha explicitado toda la información relativa a los balances
de materia (ecuaciones de diseño), es necesario codificar el balance
de energía único a la mezcla reaccionante, que dependerá de las dos
reacciones principales.
%Los calores de reacción en condiciones estándar (kJ/kmol), que
dependen de las entalpías de formación de los compuestos involucrados
en las reacciones y de las relaciones estequiométricas existentes:
deltaHr10=68.71e3; deltaHr20=-43.31e3; %kJ/kmol
%La influencia del cambio de temperatura (reacción global endotérmica)
sobre la entalpía de reacción se mide a partir de parámetros
termodinámicos, relacionando calor específico con T:
R=8.314; %kJ/kmol K
Cp1=R*(3.518+20.001e-3*Y(6)-6.002e-6*Y(6)^2);
```

Planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol

```
Cp2=R*(1.693+17.978e-3*Y(6)-6.158e-6*Y(6)^2);
Cp4=R*(3.249+0.422e-3*Y(6)+0.083e5/Y(6)^2);
Cp3=(0.9981e5+2.0931e5*((2.0226e3/Y(6))/(sinh(2.0226e3/Y(6))))^2+1.803
0e5*((928.05/Y(6))/cosh(928.05/(Y(6))))^2)/1000; %kJ/kmol K
%Ya se pueden expresar las entalpías de reacción en función de T,
teniendo en cuenta la estequiometría del sistema reactivo (Qsensible1
y Qsensible2 se calculan empleando cálculo simbólico en otro archivo):
%Qsensible1=1*int(Cp2,Y(6),[298.15,493.15])+1*int(Cp4,Y(6),[298.15,493
.15])-1*int(Cp1,Y(6),[298.15,493.15]);
%Qsensible2=1*int(Cp3,Y(6),[298.15,493.15])+1*int(Cp4,Y(6),[298.15,493
.15])-1*int(Cp1,Y(6),[298.15,493.15])-1*int(Cp2,Y(6),[298.15,493.15]);
Qsensible1=1.3328e3; Qsensible2=2.5884e3; %Unidades: kJ/kmol
deltaHr1=deltaHr10+Qsensible1; %calores de reacción a 220°C
deltaHr2=deltaHr20+Qsensible2;
C=sum(Y(1:4))*((Cp1+Cp2+Cp3+Cp4)/4); %se desprecian los otros
subproductos
%Llegados a este punto es necesario especificar algunos de los
parámetros geométricos/transmisión de calor que aparecen al realizar
el balance de energía para un reactor tubular con intercambio de calor
D=0.0779; U=2340; rhob=950; %diámetro tubos (m),coef. transmisión
calor (kJ/h m^2 K) y densidad lecho empacado (kg/m^3)

%Ahora se introducen los términos relativos al último balance
planteado: energía al fluido calefactor que circula por la carcasa
para tener en cuenta el moderado carácter endotérmico de la reacción
que ocurre en el interior de los tubos.
Fa=15000; Cpc=0.003*Y(7)+0.78055; %kg/h y kJ/kg K

%Finalmente se expresa en la forma adecuada el vector de salida de la
%función, con el fin de poder aplicar un método numérico de Runge-
Kutta para su solución aproximada
dzdW=zeros(7,1); dzdW(1)=-r1-r2; dzdW(2)=r1-r2-2*r3; dzdW(3)=r2;
dzdW(4)=r1+r2;
dzdW(5)=r3; %Ecuaciones de diseño que comprenden los balances de
materia
dzdW(6)=(((4*U*(Y(7)-Y(6)))/(D*rhob))-(deltaHr1*r1+deltaHr2*r2))/C;
%balance de energía lado tubos
dzdW(7)=-((4*U*(Y(7)-Y(6)))/(D*rhob))/(Fa*Cpc); %balance de energía lado
carcasa
```

3. Programa de resolución de los balances de materia y energía

Una vez se dispone de las ecuaciones de diseño y de los perfiles de temperatura -en función de la masa de catalizador- de la manera que pueden ser procesados por el programa informático, se implementa un programa destinado a la resolución del sistema. A continuación, se codifica la integración numérica siguiendo un método de Runge-Kutta de 4º orden para sistemas no-rígidos.

La solución se expresa en forma de matriz de datos que se representa de manera gráfica; asimismo, también se representan los perfiles de temperatura de la mezcla reaccionante y del fluido calefactor. Finalmente, la conversión de etanol y la selectividad del sistema reactivo en acetato de etilo también se grafican en función de la cantidad de gránulos de catalizador alojada en los tubos del R-201.

```
%Primeramente se introducen unos parámetros generales relativos al
%algoritmo de resolución del propio programa (tolerancias, límites de
%integración...)
abstol=1e-7; reltol=1e-4;
options=odeset('RelTol',reltol,'Abstol',abstol);
A=(0:250:13000); %Vector que representa la masa de catalizador
%Introducción manual de las condiciones iniciales con el fin de poder
%resolver el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales.
CondicionesEntrada=[225.44;3.22;0;0;0;493.15;560.15];
%Cálculo integral empleando un método de resolución numérica de Runge-
Kutta
[W,Z]=ode45(@disenoreactor,A,CondicionesEntrada,options);

%Los flujos molares (kmol/h) obtenidos en la matriz Z se explicitan en
los términos que más convienen: tanto por ciento de conversión de
etanol (X) y tanto por ciento de selectividad en acetato de etilo (S):
X=(CondicionesEntrada(1)-Z(:,1))/CondicionesEntrada(1)*100;
S=Z(:,3)./(CondicionesEntrada(1)-Z(:,1))*2*100;
subplot(2,2,1); plot(W,X); title('Conversión de etanol'); xlabel('Masa
de catalizador (kg)'); ylabel('X EtOH (%)');
subplot(2,2,2) plot(W,S); title('Selectividad en acetato de etilo');
xlabel('Masa de catalizador (kg)'); ylabel('S EtAc (%)');
%También se puede representar el perfil de composiciones de manera
%gráfica, así como el perfil de temperaturas de la mezcla reaccionante
y del fluido calefactor para entender el comportamiento del reactor
catalítico heterogéneo R-201:
subplot(2,2,3); hold on;
plot(W,Z(:,1)),plot(W,Z(:,2),'r'),plot(W,Z(:,3),'g'),plot(W,Z(:,4),'k');
plot(W,Z(:,5),'y');
title('Perfil de concentraciones'); xlabel('Masa de catalizador
(kg)'); ylabel('Flujo molar (kmol/h)');hold off;
subplot(2,2,4); hold on; plot(W,Z(:,6)); plot(W,Z(:,7),'r');
title('Perfil de temperaturas'); xlabel('Masa de catalizador
(kg)'),ylabel('Temperatura (K)'),hold off;
```

ANEXO IV. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Contenido

1.	Alcance	2
2.	Introducción teórica	2
3.	Técnicas de financiación.....	3
4.	Costes de operación	5
4.1	Deducción de costes variables	5
4.2	Deducción de costes fijos	8
4.3	Deducción de costes de gestión.....	9
5.	Ingresos por ventas	10
6.	Flujos de caja	11
7.	Análisis de rentabilidad	13
7.1	Valor actual neto (VAN).....	13
7.2	Tasa interna de rentabilidad (TIR).....	14
7.3	Periodo de retorno o <i>payback</i>	15
8.	Análisis de sensibilidad.....	16
8.1	Variación de los costes totales de operación.....	16
8.2	Variación de los ingresos totales por ventas.....	17
8.3	Variación de la inversión inicial	18
9.	Bibliografía	19

1. Alcance

En este cuarto anexo a la Memoria del documento se realiza el estudio de viabilidad económica de la planta de producción con el fin de analizar su rentabilidad en función de dos indicadores financieros que se basan en los flujos de caja previstos, que dependen de los ingresos esperados por ventas, los costes de operación, la amortización y los pagos de los intereses motivados por el endeudamiento con una entidad financiera.

Los indicadores principales que se utilizarán serán el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de rentabilidad (TIR); también se determinará el periodo de retorno de la inversión (conocido como *payback*) y se analizará en el contexto de la vida útil de la planta.

Por último, se incluye un análisis de sensibilidad para algunas de las variables que más influencia pueden tener en el resultado final, estudiando el cambio en el valor de los diferentes indicadores financieros en función de las variaciones consideradas.

2. Introducción teórica

La evaluación del valor actual neto y de la tasa interna de rentabilidad depende de los flujos de caja para cada uno de los años de operación de la planta. El procedimiento de cálculo consistirá en determinar los ingresos por ventas de productos y subproductos y los costes de operación totales en el primer año, para posteriormente aplicar una tasa de inflación del 2% anual.

La amortización se introduce con el fin de considerar la depreciación del inmovilizado con el paso del tiempo. En este estudio de viabilidad, se deduce mediante el método alemán de cuotas fijas (metodología de amortización constante) empleando la siguiente expresión:

$$\text{Amortización anual} = \frac{\text{Inversión inicial presupuestada}}{\text{Vida útil del inmovilizado}} \quad (1)$$

El pago de los intereses de la deuda se justificará a continuación, explicitando el procedimiento que deriva en los sucesivos pagos a lo largo del periodo de operación de la planta. El beneficio antes de impuestos (BAI) se calcula como la suma de las partidas introducidas hasta el momento, considerando los ingresos como positivos y los pagos/gastos como negativos.

Los impuestos se deducen como un porcentaje del beneficio antes de impuestos; en la actualidad, en el territorio español los impuestos que aplican a explotaciones industriales oscilan el 30% del BAI. El beneficio neto (BN) se corresponde con el beneficio tras haber restado los impuestos deducidos; finalmente, el flujo de caja se calcula como la suma del beneficio neto y la cuota de amortización anual.

Para realizar el estudio de viabilidad económica, es necesario actualizar los flujos de caja al dinero de la actualidad, considerando una tasa de descuento i (también conocida como coste de oportunidad) que suele adoptar un valor del 10%. La expresión para descontar el dinero a la actualidad desde el año n es la siguiente:

$$CF_{descontado} = \frac{CF_{año\ n}}{(1 + i)^n} \quad (2)$$

Con el propósito de estudiar la situación desde un enfoque que tenga en cuenta también la inversión inicial se introduce el flujo de caja acumulado, correspondiéndose con la suma del flujo de caja neto de cada año y el flujo de caja acumulado anterior; lógicamente, el valor del flujo de caja acumulado en el año 0 será la inversión inicial presupuestada introducida con signo negativo.

Puesto que puede resultar algo complicado de comprender, el procedimiento para la deducción del flujo de caja anual se esquematiza a continuación en la tabla 1.

Tabla 1: Representación esquemática del procedimiento a seguir para el cálculo del flujo de caja neto anual

Unidad temporal (año)
Ingresos por ventas de productos y subproductos (+)
Costes de operación totales (-)
Amortización del inmovilizado (-)
Pago de intereses de la deuda contraída (-)
Beneficio antes de impuestos (BAI)
Impuestos deducidos a la explotación industrial (-)
Beneficio neto (BN)
Amortización del inmovilizado (+)
FLUJO DE CAJA

3. Técnicas de financiación

Para la inversión inicial presupuestada (ver último apartado del Presupuesto) se ha requerido el crédito de una entidad pública o privada (banco, por ejemplo), por lo que cada año se han de destinar parte de los ingresos obtenidos por ventas al pago de la deuda (amortización e intereses) contraída con la entidad financiera.

Los pagos anuales se deducen mediante el sistema francés de amortización que se basa en la estipulación de una cuota anual constante, R , que viene dada por la siguiente correlación:

$$R = P \cdot \left\{ \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right\} \quad (3)$$

en donde P es el montante del préstamo pedido, i es la tasa de interés del crédito (supuesta del 7%) y n los años de vida útil de operación de la planta.

Para saber la cantidad de intereses a pagar cada año, se utiliza una plantilla en una hoja de cálculo Excel, que consta de 5 columnas: los años de operación de la planta, la deuda pendiente restante por pagar cada año (también recibe el nombre de capital vivo), el pago de intereses anuales que se deduce como los intereses del capital vivo de año anterior, la cuota anual constante calculada con la ecuación 3 y el pago anual de la deuda, o amortización del préstamo, deducida como el pago de los intereses anuales menos la cuota anual constante.

Para el crédito que se solicita con el fin de financiar la instalación de la planta de producción de acetato de etilo, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Deducción del pago de la deuda contraída para financiar la instalación de la planta

Año	Capital vivo	Amortización del préstamo	Pago intereses anuales	Cuota anual constante
0	7 422 334.13 €			
1	7 241 281.68 €	-181 052.45 €	519 563.39 €	700 615.83 €
2	7 047 555.57 €	-193 726.12 €	506 889.72 €	700 615.83 €
3	6 840 268.62 €	-207 286.94 €	493 328.89 €	700 615.83 €
4	6 618 471.59 €	-221 797.03 €	478 818.80 €	700 615.83 €
5	6 381 148.77 €	-237 322.82 €	463 293.01 €	700 615.83 €
6	6 127 213.35 €	-253 935.42 €	446 680.41 €	700 615.83 €
7	5 855 502.45 €	-271 710.90 €	428 904.93 €	700 615.83 €
8	5 564 771.79 €	-290 730.66 €	409 885.17 €	700 615.83 €
9	5 253 689.98 €	-311 081.81 €	389 534.03 €	700 615.83 €
10	4 920 832.44 €	-332 857.54 €	367 758.30 €	700 615.83 €
11	4 564 674.88 €	-356 157.56 €	344 458.27 €	700 615.83 €
12	4 183 586.29 €	-381 088.59 €	319 527.24 €	700 615.83 €
13	3 775 821.49 €	-407 764.79 €	292 851.04 €	700 615.83 €
14	3 339 513.16 €	-436 308.33 €	264 307.50 €	700 615.83 €
15	2 872 663.25 €	-466 849.91 €	233 765.92 €	700 615.83 €
16	2 373 133.84 €	-499 529.41 €	201 086.43 €	700 615.83 €
17	1 838 637.38 €	-534 496.47 €	166 119.37 €	700 615.83 €
18	1 266 726.16 €	-571 911.22 €	128 704.62 €	700 615.83 €
19	654 781.15 €	-611 945.00 €	88 670.83 €	700 615.83 €
20	0.00 €	-654 781.15 €	45 834.68 €	700 615.83 €

donde se puede comprobar que, al final del último año de operación de la planta, la deuda -intereses mediante- ha sido pagada en su totalidad. La columna de pago de intereses anuales ha de ser considerada en la deducción de los flujos de caja que permiten analizar la rentabilidad de la planta.

4. Costes de operación

La estimación de los costes de operación totales de la planta se divide en tres partidas principales:

- Costes variables, asociados a la tasa de producción, que se calcularán en base a los resultados proporcionados por los balances de materia y energía y a los precios de reactivos, productos y subproductos presentados por las bases de datos consultadas. A su vez consta de 4 subapartados: materias primas, utilidades, catalizador y empaquetado & distribución.
- Costes fijos, independientes del régimen de producción adoptado en la planta, que se calculan empleando un método factorizado, y que se consideran como inmovilizados en la inversión. Agrupa diferentes categorías como mantenimiento, mano de obra directa e indirecta, laboratorio, patentes & *royalties* y seguro de la instalación.
- Costes adicionales de gestión, que también se deducen en base a un factor heurístico, e incluyen gastos administrativos (sueldos del gerente y subordinados, gastos de oficina de gerencia y similares), gastos comerciales (derivados de la venta del producto) e I+D+i (gastos asociados a investigación, desarrollo e innovación).

4.1 Deducción de costes variables

Para estipular los costes asociados a la adquisición de materias primas, se acude a la información presentada en la Memoria relativa a los precios y en el Anexo I. Balances de materia y energía en lo tocante al flujo horario de alimentación a la planta para satisfacer la capacidad de diseño de 50 000 t/año de acetato de etilo.

En la figura 17 del primero de los documentos se dispone de una gráfica que muestra la evolución del precio del bioetanol en los últimos dos años; teniendo en cuenta la tendencia ascendente mostrada a partir de septiembre de 2017 se puede llegar a la conclusión de que es factible adquirir el m³ de bioetanol a un precio de 500 €. La cantidad anual de bioetanol que se necesita, teniendo en cuenta una operación de 24 horas al día durante 330 días al año, se deduce con una simple multiplicación; una vez conocida la masa que se requiere, el flujo volumétrico se obtiene empleando el dato de la densidad en condiciones normales (25°C y 1 atm).

Tabla 3: Estimación de costes variables asociados a la compra de materias primas

Parámetro	Valor
Precio medio de bioetanol en 2018 (€/m ³)	500
Flujo másico alimentación (kg/h)	6 875.31
Cantidad anual bioetanol (kg)	54 452 476
Densidad alimentación (kg/m ³)	790
Volumen bioetanol requerido (m ³)	68 927.20

En la tabla 3 se recogen los datos involucrados en el cálculo de los costes asociados a la adquisición de materias primas. Es importante destacar que la corriente adquirida no es bioetanol puro, sino que al ser un producto de fermentación de residuos de biomasa contendrá una cierta cantidad (2.06% en este caso) de subproductos del proceso fermentativo: acetaldehído.

En lo tocante a la estimación del coste de las utilidades necesarias para la operación de la planta un procedimiento habitual consiste en aplicar un método factorizado con respecto al coste de materias primas: las utilidades implican un gasto del 5% en relación a lo invertido en reactivos. No obstante, al haber realizado los balances de materia y de energía al equipamiento que se instala en la planta de producción se puede realizar una estimación mucho más acertada. Las diferentes utilidades que se emplean en la planta son las siguientes:

- Electricidad en las bombas centrífugas P-101 A/B, P-401 A/B, P-402 A/B, P-403 A/B y P-404 A/B y en el compresor K-301.
- Agua de enfriamiento en los intercambiadores de calor de carcasa y tubos E-301, E-401 y en los condensadores de la columna de destilación azeotrópica T-401 y de la torre de purificación de reciclo T-402.
- Agua de refrigeración en el condensador de la torre de purificación de producto T-403.
- Vapor de baja presión en los calderines de fondos de la columna de destilación azeotrópica T-401 y de la torre de purificación de producto T-403.
- Vapor de media presión en el calderín de fondos de la torre de purificación de reciclo T-402, en el evaporador kettle E-102 y en el intercambiador de calor de carcasa y tubos E-101.
- Vapor de alta presión en el intercambiador de calor de carcasa y tubos E-103.
- Aceite térmico Dowtherm Q en la carcasa del reactor R-201 para compensar el carácter endotérmico del sistema de reacción.
- Líquido iónico 1-etil-3-metilimidazolio metanosulfonato (de la casa comercial io·li·tec) a utilizar como *entrainer* para llevar a cabo la destilación azeotrópica en la T-401.
- Otros servicios: aire comprimido para instrumentación, agua de uso general, etc...

En base a la bibliografía consultada se pueden utilizar los siguientes precios para las utilidades empleadas:

Tabla 4: Costes de utilidades "clásicas": agua, vapor y electricidad

Agua de enfriamiento (€/t)	0.02	mps (€/t)	7.5
Agua de refrigeración (€/t)	0.22	hps (€/t)	12
lps (€/t)	5	Electricidad (€/kWh)	0.084

En base a los balances de materia y de energía presentados en el Anexo I, se calcula la cantidad total de cada una de las utilidades (electricidad para bombas, agua líquida para enfriamiento de corrientes en intercambiadores y vapor de agua para calentamiento de corrientes); el valor obtenido multiplicado por el precio permite estimar los gastos variables asociados a la adquisición de utilidades. En la tabla 5 se presentan las cantidades totales que se requieren para un correcto funcionamiento de la planta de producción.

Tabla 5: Requerimientos de utilidades para la operación anual de la planta

Parámetro	Valor
Agua de enfriamiento (t/año)	2 135 571.47
Agua de refrigeración (t/año)	264 431.29
Vapor de baja presión (t/año)	22 987.91
Vapor de media presión (t/año)	66 364.09
Vapor de alta presión (t/año)	4 103.20
Electricidad (kWh)	957 977.77

En lo relativo al aceite térmico y al líquido iónico, con el fin de conseguir una operación viable es necesario incluir circuitos cerrados para su continua recirculación dado que son recursos más caros que las utilidades “tradicionales”. En el diseño riguroso del reactor, presentando en el Anexo II. Cálculos Justificativos, se llegó a la conclusión de que se requieren 15000 kg/h de fluido térmico para compensar la endotermicidad de las reacciones que ocurren en su interior.

Por lo tanto, se va a gestionar la adquisición de 150 000 kg anuales de Dowtherm Q con la previsión de renovar el contenido que circula por el circuito cerrado al menos una vez al mes por cuestiones de degradación térmica (su temperatura nunca baja de 220°C). El precio de adquisición del fluido calefactor es aproximadamente de 12 \$/gal¹, lo cual deriva en un gasto de 500 000 € al año.

El razonamiento para el líquido iónico es análogo, teniendo en cuenta que se usa menos cantidad de producto (se necesita poco más de 820 kg/h para la destilación extractiva) pero que es mucho más caro. El presupuesto que habilita la casa *Ionic Liquid Technologies* es de 1890 €/kg; no obstante, considerando que se van a adquirir 8200 kg anuales aproximadamente el coste desciende aproximadamente 6-7 veces. Bajo la suposición de que los costes en líquido iónico son 5 veces mayores (2 500 000 €) que los gastos vinculados al aceite térmico, el kilogramo de *entrainer* sale a poco más de 300 €, lo cual es factible desde un punto de vista heurístico.

¹ HIMMELBLAU D, RIGGS J. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*. Chapter 9: Energy Balances. Problem 1, Section 9.2.7. Ed. Prentice-Hall. Disponible online en: <https://che.gg/2yrMNue>

La última partida que se va a analizar en la deducción de los costes variables es el gasto que hay que realizar para la compra de catalizador. A pesar de que se trata de un compuesto altamente estable en las condiciones de reacción (gran presencia de H₂ en el sistema que auto-regenera el entramado) la operación en continuo 24 horas durante 330 días al año genera un cierto desgaste, por lo que lo recomendable es sustituir los gránulos de catalizador en el mes de parón dedicado a operaciones de mantenimiento.

Los compuestos catalíticos son muy poco económicos debido a que su formulación suele ser específica y contener metales preciosos (platino, oro, plata...); no obstante, en este caso al tratarse de un catalizador comercial utilizado de forma habitual en la industria para convertir los ácidos grasos en alcoholes y no contiene metales preciosos se puede encontrar por un precio más económico. La suposición realizada en este caso es que se pueden adquirir los *pellets* de catalizador por 500 €/kg. Las diferentes partidas de costes variables de operación se recogen en la tabla 6.

Tabla 6: Recopilación de costes variables

A. COSTES VARIABLES	PRECIO ESTIMADO
Materias primas	34 463 592.41 €
Utilidades	3 842 761.11 €
Catalizador	6 500 000.00 €
Empaquetado & Distribución	Despreciable
TOTAL	44 806 353.51 €

Se puede observar que las utilidades suponen un 11% aprox. del coste vinculado a materias primas, claramente superior al 5% heurístico, auspiciado por la utilización de un líquido iónico que lógicamente encarece la operación.

4.2 Deducción de costes fijos

Los costes inmovilizados en la inversión son independientes de la tasa de producción dominante en el régimen de operación de la planta, por lo que para su estimación se utilizará un método factorizado. En la tabla 7 se desglosa el presupuesto global de la planta en capital inmovilizado y capital circulante en base a los datos presentados en el documento titulado Presupuesto:

Tabla 7: Estimación del capital inmovilizado necesario para el funcionamiento de la planta

Desglose de la estimación clase IV del presupuesto global	
Capital inmovilizado	6 680 037.06 €
Capital circulante	742 297.07 €

La partida de capital inmovilizado será utilizada como base para la factorización de algunos de los puntos que engloban los costes fijos; la otra referencia serán los costes de mano de obra directa, que dependerán del número de operarios que sea necesario tener en planta, que se operará en un régimen de turnos con 5 operarios por turno lo que permite una rotación de cuatro turnos con suficiente holgura para fines de semana,

vacaciones, periodos de baja... De esto se extrae que la plantilla de mano de obra directa constará de 20 operarios.

La última actualización del salario mediano en España -de finales de 2017- situado justo en medio de todos los salarios del país y que divide a los que más y menos cobran asume un valor de 1600 € brutos. Por lo tanto, suponiendo dos pagas extraordinarias -una en verano y otra en navidades-, cada operario percibirá 14 pagas al año de 1600€ antes de deducir los impuestos correspondientes. El perfil de factores utilizado para la deducción de los costes fijos, así como su estimación, se resume a continuación en la tabla 8.

Tabla 8: Estimación de costes fijos vinculados a la planta de producción

B. COSTES FIJOS	FACTORIZACIÓN	IMPORTE
Mantenimiento	8% capital inmovilizado	534 402.96 €
Mano de obra directa	-	448 000.00 €
Mano de obra indirecta	40% mano de obra directa	179 200.00 €
Laboratorio	20% mano de obra directa	89 600.00 €
Licencias, <i>royalties</i> ...	3% capital inmovilizado	200 401.11 €
Seguro	1.5% capital inmovilizado	100 200.56 €
TOTAL		1 551 804.63 €

4.3 Deducción de costes de gestión

Esta partida incluye otros gastos en los que incurre la compañía, entre los que destacan sueldos de gerencia, publicidad e investigación y desarrollo. La heurística dice que estos costes suelen oscilar entre el 20-30% de los costes directos de operación (suma de los costes variables y fijos). Para el presente estudio de viabilidad económica, se supone el factor del 20%.

Los costes de gestión, así como los costes totales de la operación se resumen a continuación en la tabla 9.

Tabla 9: Deducción de costes totales de operación

Partidas de costes	Importe
Costes variables	44 806 353.51 €
Costes fijos	1 551 804.63 €
Costes de gestión	9 271 631.63 €
COSTES TOTALES DE OPERACIÓN	55 629 789.77 €

5. Ingresos por ventas

Los ingresos de la planta se deben principalmente a la venta de los productos y subproductos generados como resultado de su explotación. La producción de acetato de etilo coincide con la capacidad de diseño de la planta, mientras que la obtención anual del principal subproducto -hidrógeno gas libre de CO_x- se ha determinado en el Anexo I. Balances de materia y energía.

Las bases de datos de las cuales se extraen los precios de estos compuestos se referencian en la Memoria; en este Anexo de estudio de viabilidad económica únicamente se recogen en la tabla 10 los datos de producción y precios que se utilizan para inferir los ingresos por ventas.

Tabla 10: Ingresos por ventas de productos y subproductos

Parámetro	Valor
Producción acetato de etilo (t/año)	50 000
Precio acetato de etilo (€/t)	1 070
Producción hidrógeno (t/año)	2 333.60
Precio hidrógeno (€/t)	1 700
INGRESOS POR VENTAS ANUALES (€)	57 467 109.70 €

6. Flujos de caja

Una vez deducidos los ingresos por ventas, los costes de operación totales asociados al primer año de operación, la amortización anual y el pago de los intereses debido al endeudamiento con la entidad financiera, ya se está en disposición de evaluar los flujos de caja a lo largo de la vida útil de la planta.

La amortización se considera constante a lo largo de los 20 años de operación, según lo estipulado en la ecuación 1 del anexo; el pago de la deuda contraída con la entidad financiera se presenta en la tabla 2. Finalmente, los ingresos por ventas y los costes de operación se actualizan cada año aplicando una tasa de inflación del 2%. Aplicando el algoritmo de cálculo presentado en la tabla 1 se construye la plantilla que permite la evaluación de los flujos de caja en cada año de operación de la planta de producción, actualizando los flujos de caja al dinero actual y determinando la caja acumulada -que también considera la inversión inicial-.

Tabla 11: Deducción de flujos de caja

Año	0	1	2
Ingresos por ventas	-	57 467 109.70 €	58 616 451.90 €
(Costes de operación)	-	55 629 789.77 €	56 742 385.57 €
(Amortización)	-	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	-	519 563.39 €	506 889.72 €
BAI	-	946 639.83 €	996 059.90 €
Deducción de impuestos	-	283 991.95 €	298 817.97 €
BN	-	662 647.88 €	697 241.93 €
Cash Flow	-7 422 334.13 €	1 033 764.59 €	1 068 358.64 €
CF descontado	-	939 785.99 €	882 941.02 €
Caja acumulada	-7 422 334.13 €	-6 482 548.14 €	-5 599 607.11 €

Año	3	4	5
Ingresos por ventas	59 788 780.94 €	60 984 556.56 €	62 204 247.69 €
(Costes de operación)	57 877 233.28 €	59 034 777.95 €	60 215 473.51 €
(Amortización)	371 116.71 €	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	493 328.89 €	478 818.80 €	463 293.01 €
BAI	1 047 102.06 €	1 099 843.10 €	1 154 364.46 €
Deducción de impuestos	314 130.62 €	329 952.93 €	346 309.34 €
BN	732 971.44 €	769 890.17 €	808 055.12 €
Cash Flow	1 104 088.15 €	1 141 006.88 €	1 179 171.83 €
CF descontado	829 517.77 €	779 323.05 €	732 172.93 €
Caja acumulada	-4 770 089.35 €	-3 990 766.30 €	-3 258 593.37 €

Año	6	7	8
Ingresos por ventas	63 448 332.64 €	64 717 299.29 €	66 011 645.28 €
(Costes de operación)	61 419 782.98 €	62 648 178.64 €	63 901 142.21 €
(Amortización)	371 116.71 €	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	446 680.41 €	428 904.93 €	409 885.17 €
BAI	1 210 752.54 €	1 269 099.02 €	1 329 501.19 €
Deducción de impuestos	363 225.76 €	380 729.71 €	398 850.36 €
BN	847 526.78 €	888 369.31 €	930 650.83 €
Cash Flow	1 218 643.49 €	1 259 486.02 €	1 301 767.54 €
CF descontado	687 892.48 €	646 315.48 €	607 284.17 €
Caja acumulada	-2 570 700.89 €	-1 924 385.41 €	-1 317 101.25 €

Año	9	10	11
Ingresos por ventas	67 331 878.18 €	68 678 515.75 €	70 052 086.06 €
(Costes de operación)	65 179 165.05 €	66 482 748.35 €	67 812 403.32 €
(Amortización)	371 116.71 €	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	389 534.03 €	367 758.30 €	344 458.27 €
BAI	1 392 062.40 €	1 456 892.39 €	1 524 107.77 €
Deducción de impuestos	417 618.72 €	437 067.72 €	457 232.33 €
BN	974 443.68 €	1 019 824.67 €	1 066 875.44 €
Cash Flow	1 345 560.39 €	1 390 941.38 €	1 437 992.14 €
CF descontado	570 648.96 €	536 268.11 €	504 007.47 €
Caja acumulada	-746 452.29 €	-210 184.18 €	293 823.30 €

Año	12	13	14
Ingresos por ventas	71 453 127.78 €	72 882 190.34 €	74 339 834.15 €
(Costes de operación)	69 168 651.39 €	70 552 024.41 €	71 963 064.90 €
(Amortización)	371 116.71 €	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	319 527.24 €	292 851.04 €	264 307.50 €
BAI	1 593 832.45 €	1 666 198.18 €	1 741 345.03 €
Deducción de impuestos	478 149.73 €	499 859.45 €	522 403.51 €
BN	1 115 682.71 €	1 166 338.73 €	1 218 941.52 €
Cash Flow	1 486 799.42 €	1 537 455.43 €	1 590 058.23 €
CF descontado	473 740.12 €	445 346.07 €	418 712.03 €
Caja acumulada	767 563.41 €	1 212 909.49 €	1 631 621.51 €

Año	15	16	17
Ingresos por ventas	75 826 630.83 €	77 343 163.45 €	78 890 026.72 €
(Costes de operación)	73 402 326.20 €	74 870 372.73 €	76 367 780.18 €
(Amortización)	371 116.71 €	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	233 765.92 €	201 086.43 €	166 119.37 €
BAI	1 819 422.00 €	1 900 587.59 €	1 985 010.46 €
Deducción de impuestos	545 826.60 €	570 176.28 €	595 503.14 €
BN	1 273 595.40 €	1 330 411.31 €	1 389 507.32 €
Cash Flow	1 644 712.11 €	1 701 528.02 €	1 760 624.03 €
CF descontado	393 731.00 €	370 302.07 €	348 330.08 €
Caja acumulada	2 025 352.52 €	2 395 654.59 €	2 743 984.67 €

Año	18	19	20
Ingresos por ventas	80 467 827.25 €	82 077 183.79 €	83 718 727.47 €
(Costes de operación)	77 895 135.78 €	79 453 038.50 €	81 042 099.27 €
(Amortización)	371 116.71 €	371 116.71 €	371 116.71 €
(Pago intereses deuda)	128 704.62 €	88 670.83 €	45 834.68 €
BAI	2 072 870.14 €	2 164 357.76 €	2 259 676.81 €
Deducción de impuestos	621 861.04 €	649 307.33 €	677 903.04 €
BN	1 451 009.10 €	1 515 050.43 €	1 581 773.77 €
Cash Flow	1 822 125.81 €	1 886 167.14 €	1 952 890.48 €
CF descontado	327 725.34 €	308 403.40 €	290 284.73 €
Caja acumulada	3 071 710.01 €	3 380 113.41 €	3 670 398.13 €

7. Análisis de rentabilidad

Para llevar a cabo el análisis de rentabilidad se emplearán los tres indicadores financieros señalados en el alcance de este Anexo IV.

7.1 Valor actual neto (VAN)

El VAN es un indicador financiero que mide los flujos de los futuros ingresos y gastos que se van a producir en un proyecto con el propósito de estipular si, descontando la inversión inicial (coincidente con el valor presupuestado), habría beneficios. El criterio de aceptación de un proyecto, en términos de viabilidad económica, basado en este indicador financiero es un valor actual neto positivo; cuanto mayor sea, la inversión presentará un mayor interés para los inversores.

En otras palabras, es la diferencia entre los flujos de caja actualizados que produce una inversión, a una tasa de descuento prefijada, y las inversiones actualizadas a esa misma

tasa, requeridas para hacer esa inversión; por lo tanto, informa del valor absoluto de un proyecto en términos monetarios en el momento actual.

El valor actual neto de una inversión consistirá en restar la inversión inicial de la suma de flujos de caja generados a lo largo de la vida útil de la planta convertidos al equivalente en dinero presente (lo que en la evaluación anterior recibe el nombre de flujo de caja descontado). El VAN se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^{vida\ útil} \frac{CF_i}{(1+i)^n} \quad (4)$$

en donde I_0 representa la inversión inicial y el término positivo viene dado por los flujos de caja actualizados a través del coste de oportunidad i (valor habitual del 10%, estimado en base a las inversiones actuales), que corrige el cambio de valor del capital con respecto al tiempo.

Si el VAN adopta valores positivos, la inversión producirá ganancias por encima de la rentabilidad exigida por el coste de oportunidad; de tomar valores negativos, el proyecto no sería lo suficientemente viable como para satisfacer la demanda de rentabilidad. No obstante, desde el enfoque industrial, se considera aceptable un VAN mayor en un 7-8% a la inversión inicial; en este caso, para la planta de producción de acetato de etilo el VAN obtenido es superior a 3 650 000 €, lo cual supone un 49.5% de la inversión inicial. Por este motivo, según este indicador financiero la inversión es altamente rentable.

7.2 Tasa interna de rentabilidad (TIR)

El método de la tasa interna de rentabilidad es el método más comúnmente utilizado para llevar a cabo análisis económicos en ingeniería; se denomina también método del inversionista o método de flujo de efectivo de descuento.

La TIR es la herramienta económica que permite calcular la tasa de interés i que permitiría reinvertir los fondos empleados en financiar el proyecto una vez se agote su vida útil. Se define como el tipo de actualización de capital que hace nulo el valor actual neto para el tiempo de vida útil estipulado, siendo por lo tanto la tasa de descuento máxima sobre la cual no se producen pérdidas.

Cuando la TIR es igual a la tasa de descuento (coste de oportunidad, i), la construcción de la planta no supone ningún tipo de beneficio, y cuanto mayor sea la TIR con respecto a i más rentable será la instalación. La expresión para su cálculo deriva directamente de la ecuación del valor actual neto cuando esta se iguala a cero:

$$I_0 = \sum_{n=1}^{vida\ útil} \frac{CF_i}{(1+TIR)^n} \quad (5)$$

Sin embargo, el cálculo de este indicador financiero se va a acometer de manera automática en la hoja de cálculo Excel, ya que el software trae implementada una

función que devuelve el valor de la tasa interna de rentabilidad si los inputs son los flujos de caja derivados de la operación de la planta a lo largo de su vida útil. Para el caso que se está analizando el valor de la TIR es 15.87%, un 60% superior al coste de oportunidad considerado. Nuevamente, según este indicador financiero, la planta es rentable.

7.3 Periodo de retorno o *payback*

Este indicador financiero calcula el plazo que ha de transcurrir hasta que la suma de los cobros actualizados se hace igual a la suma de los pagos actualizados, es decir, los flujos de caja actualizados a la tasa de referencia igualan al valor de las inversiones actualizadas a esa misma fecha. Por lo tanto, el periodo de retorno se alcanza cuando el valor actual neto se iguala a cero.

Más que como un criterio de selección de inversiones se emplea como un requisito que ha de cumplir el proyecto. Para calcular el *payback* se representa la caja acumulada con respecto al año de operación, como se realiza a continuación en la figura 1.

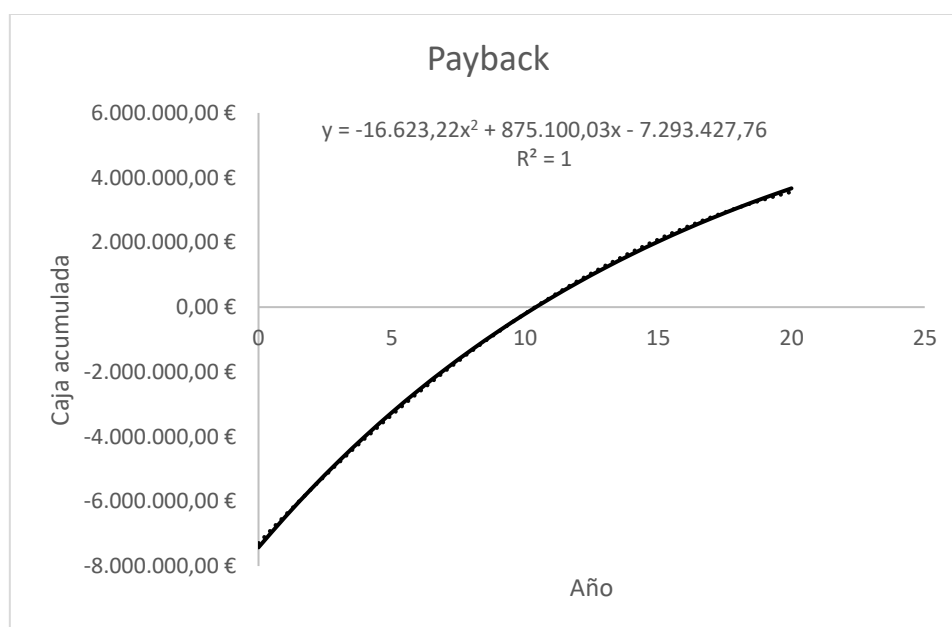


Figura 1: Periodo de retorno de la planta de producción de acetato de etilo

La correlación entre el año de operación y la caja acumulada se puede explicitar de manera analítica mediante un análisis de mínimos cuadrados; si se desarrolla una expresión polinómica de orden 2, el ajuste parabólico es perfecto ($R^2=1$). Para las condiciones de análisis el periodo de retorno es de 10 años y 4 meses, ligeramente superior al ecuador de la vida útil de la planta de producción, lo que indica que se generan beneficios netos durante los 10 últimos años de operación.

Tabla 12: Resultados del estudio económico que demuestra la viabilidad de la planta

VAN	3 670 398.13 €	>	0 €
TIR	15.87 %	>	10 %
Periodo de retorno	10 años y 4 meses	<	20 años

8. Análisis de sensibilidad

Para concluir el estudio de viabilidad económica se realiza un pequeño análisis de sensibilidad, que permite examinar los efectos de las incertidumbres supuestas sobre la rentabilidad del proyecto. Da una idea básica acerca del grado de riesgo involucrado en la toma de decisiones; para que sea efectivo, es útil determinar con anterioridad cuáles variables son las más críticas para el proyecto.

El análisis de sensibilidad consiste en el efecto que producen sobre los indicadores financieros las variaciones en los valores de las variables. Primero se identifican las variables clave que influyen sobre el coste del proyecto y sus beneficios; en este caso, teniendo en cuenta que la mayor influencia sobre los costes de operación y los ingresos por ventas es debida a la adquisición de materias primas y venta de acetato de etilo respectivamente, se considerará como variable a estudiar el precio de ambos. Además, atendiendo a la fluctuación de los mercados del bioetanol y del acetato de etilo (presentados en la memoria) se justifica aun en mayor medida el estudio.

Posteriormente se introducen cambios porcentuales (en este caso se van a considerar variaciones del 5%, tanto positivas como negativas) y se determinan las consecuencias de los cambios de estas variables, examinando el cambio en los indicadores financieros empleados.

Finalmente, se realizará un análisis de rentabilidad en base a cambios en la inversión inicial presupuestada, ya que se trata de una estimación de clase IV y hay que analizar su influencia sobre la viabilidad económica de la planta en ambos extremos de la horquilla de precisión.

8.1 Variación de los costes totales de operación

Atendiendo a las tablas 6 y 9 se puede observar que la partida que tiene una mayor ponderación en los costes totales de operación es la adquisición de materias primas, sujeta a:

- Flujo de alimentación que satisfaga el requerimiento de la capacidad de diseño de la planta.
- Precio volátil que depende de la situación de los mercados.

Puesto que la planta se diseña para producir 50 000 t/año de acetato de etilo, la cantidad necesaria de alimentación viene fijada por el balance de materia (presentado en el Anexo I). Por ello, la variación crítica en los costes totales de operación viene estipulada por una variación en el precio considerado para la adquisición de la corriente rica en bioetanol. Suponiendo incrementos porcentuales del precio, tanto positivos como negativos, del 5% los indicadores financieros responden del modo presentado en la tabla 13.

Tabla 13: Análisis de sensibilidad para fluctuaciones en el precio de materias primas

Indicador financiero	+5%	-5%
VAN	-3 378 091.97 €	17 767 378.35 €
TIR	3.6 %	35.9 %
Periodo de retorno	No hay <i>payback</i>	4 años

Se puede observar por lo tanto que el precio de adquisición del volumen de bioetanol tiene una influencia crítica sobre la rentabilidad del proceso, ya que un aumento del 5% en el precio implicaría que la planta no recuperase la inversión inicial; no obstante, una disminución del 5% provocaría que la planta recuperase en un 250% el capital invertido al comienzo de la operación.

Con el propósito de mitigar los efectos adversos sobre el proyecto se firmaría alguna especie de convenio con Bioetanol Galicia para asegurar un suministro de la corriente rica en bioetanol a un precio estable aprovechando la situación ventajosa de ser su principal cliente. En el caso de que no se pudiese llegar a ningún acuerdo, habría que contactar con productoras de bioetanol que tengan precios más bajos; no obstante, habría que tener en cuenta que al precio de compra hay que sumar los gastos derivados del transporte logístico.

8.2 Variación de los ingresos totales por ventas

Los principales ingresos de la planta están vinculados a la venta del acetato de etilo obtenido mediante la deshidrogenación catalítica del bioetanol. A priori es importante considerar que según las predicciones del estudio de mercado presentado en la memoria, es un mercado creciente con una importancia cada vez mayor y con una tendencia en los precios al alza. El estudio de sensibilidad se presenta en la tabla 14.

Tabla 14: Análisis de sensibilidad para fluctuaciones en el mercado del acetato de etilo

Indicador financiero	+5%	-5%
VAN	21 906 754.93 €	-5 447 780.27 €
TIR	41.6 %	1.4 %
Periodo de retorno	4 años	No hay <i>payback</i>

Hay que considerar que las grandes fluctuaciones producidas en la pasada época fueron debidas a un mercado muy volátil de uno de los reactivos utilizados en la obtención del acetato de etilo por esterificación (ácido acético). En los próximos años, donde se espera que se imponga la alternativa por deshidrogenación catalítica, se estima un mercado muy estable con una muy leve tendencia al alza.

No obstante, para mitigar el efecto negativo que tendría un descenso en los precios de venta (muy poco probable), la planta se podría aprovechar de las subvenciones

concedidas por las organizaciones gubernamentales al impulsar una industria verde, partiendo de reactivos que se derivan de la valorización de residuos de segunda generación.

8.3 Variación de la inversión inicial

La estimación del presupuesto se basa en dimensionamiento básico del equipamiento a partir de la información proporcionada por los balances de materia y de energía. Además, para las partidas parciales más allá de la compra e instalación de los equipos se ha empleado un método factorizado genérico. Todo ello implica que la presupuestación está lejos de ser exacta y presenta una cierta incertidumbre. En este punto se estudia la sensibilidad ante cambios en la presupuestación primigenia en la tabla 15.

Tabla 15: Análisis de sensibilidad para estudiar la incertidumbre asociada a la presupuestación inicial

Indicador financiero	+5%	-5%
VAN	3 227 637.26 €	4 113 159.01 €
TIR	15.0%	16.9%
Periodo de retorno	12 años	9 años

Se puede observar que esta variable no es tan crítica como las dos anteriores puesto que en la horquilla considerada, los indicadores financieros muestran poca sensibilidad y la planta sería rentable en cualquiera de los dos casos estudiados, proporcionando asimismo resultados muy similares.

9. Bibliografía

AGRICULTURE AND HORTICULTURE DEVELOPMENT BOARD. *Cereals & oilseeds: ethanol prices slump pinches*. [sitio web] United Kingdom [consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://cereals.ahdb.org.uk/markets/market-news/2017/november/14/grain-market-daily-141117.aspx>

FLACH B, LIEBERZ S, ROSSETTI A. *EU biofuels annual 2017 report*. The Hague. Global Agricultural Information Network, USDA Foreign Agricultural Service. GAIN Report Number: NL7015

INDEPENDENT CHEMICAL INFORMATION SERVICE, ICIS. *Ethyl acetate prices, markets & analysis*. [sitio web] Publicado en septiembre 2017 [consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <https://www.icis.com/chemicals/ethyl-acetate/?tab=tbc-tab2>

MINISTERIO DE ENERGÍA, TURISMO Y AGENDA DIGITAL. *Precio neto de la electricidad para uso doméstico y uso industrial (€/kWh)*. Gobierno de España [en línea] Actualizado a diciembre de 2017 [sitio web, consultado en mayo 2018]. Disponible online en: <https://bit.ly/2IoUDcH>

REDACCIÓN LA VANGUARDIA. El salario medio cae a 1 878 euros brutos al mes tras años de subidas. *La Vanguardia*. [en línea] 8 de noviembre de 2017 [sitio web, consultado en mayo 2018] Disponible online en: <https://bit.ly/2IJ9pdS>

SINNOTT R, TOWLER G. *Chemical Engineering Design. Principles, practice and economics of plant and process design*. 1ª edición. San Diego, CA, USA: Ed. Elsevier, 2008, ISBN 13: 978-0-506-8423-1.

S&P GLOBAL PLATTS. *Three US producers raise ethyl acetate prices by 8 cents/lb for May*. [sitio web] USA, publicado en mayo 2017 [consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <https://bit.ly/2k5fpiX>

TURTON R, BAILIE R, WHITING W, SHAEIWITZ J. *Analysys, Synthesis and Design of Chemical Processes*. 3ª edición. USA: Ed. Pearson Education, 2009, ISBN-10: 0-13-512966-4.

VIAN A. *El pronóstico económico en química industrial*. 3ª edición. Madrid (España): Ed. Alhambra SA, 1975. ISBN: 84-205-0185-9.

ANEXO V. FICHAS DE SEGURIDAD

ÍNDICE

1. Etanol
2. Acetaldehído
3. Acetato de etilo
4. Hidrógeno
5. Acetaldol
6. Metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio
7. Aceite térmico Dowtherm Q

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 1 of 9

COMPANY DETAILS

Name : NCP Alcohols **Emergency telephone No.:** +27 (31) 579 2004
Address : 121 Sea Cow lake Road, Durban, 4001, South Africa **Telephone :** +27 (31) 560 1111
Fax : +27 (31) 579 2776

1. Product and Company Identification

(Page 1 may be used as an emergency safety data sheet)

Trade name	: Ethanol (Industrial, Absolute or Anhydrous, Rum, Light Spirits, Extra Neutral Potable, Neutral Potable, Rectified Extra Neutral and High Purity Extra Neutral Potable Alcohol)	Chemical abstract No.	: 64-17-5
		Molecular Mass	: 46,08
Chemical family	: Aliphatic Alcohol	NIOSH No.	: KQ 6300000
Chemical name	: Ethanol	Hazchem code	: 2(S) E; 3(S) E
Synonyms	: Ethyl Alcohol, See Trade name	UN No.	: 1170

2. Composition:

Hazardous components : Ethyl Alcohol (75.0 – 99.9%^{v/v})
 EEC classification : 200 – 578 – 6³⁰
 R Phrases : R11 (Highly Flammable)

3. Hazards Identification:

Main Hazard : Harmful if swallowed or inhaled. Possible aspiration hazard if swallowed (can enter lungs and cause damage). May be irritating to the skin, eyes and respiratory tract. Over exposure may cause CNS depression. Possible reproductive hazard.

Flammability : Flash Point 12°C. Extremely flammable liquid (R11). Ignition temperature 425°C.

Chemical Hazard : Ethanol is a flammable liquid whose vapours can form ignitable and explosive mixtures with air at normal room temperatures. Thus, an aqueous mixture containing 30% ethanol can produce a flammable mixture of vapour and air at 29°C, and even one containing only 5% alcohol can produce a flammable mixture at 62°C.¹ Ethanol reacts vigorously with a wide range of oxidizing materials and other chemicals². e.g. Disulphuryl Difluoride, Silver Nitrate, Bromine Pentafluoride, Potassium Perchlorate, Nitrosyl Perchlorate, Chromyl Chloride, Chloryl Perchloride, Uranyl Perchlorate, Chromium Trioxide, Fluorine Nitrate, Dioxxygen Difluoride, Uranium Hexafluoride, Iodine Heptafluoride, Tetrachlorosilane, Permanganic acid, Nitric acid [the nitric acid fizz reaction used formally for cleaning laboratory glassware should not be used^{3,5}], Hydrogen Peroxide, Peroxodisulphuric acid, Potassium Dioxide, Sodium Peroxide, Potassium Permanganate, Ruthenium (VIII) Oxide, Platinum, Potassium⁶, Potassium *tert* – Butoxide, Silver Oxide and Sodium⁷.

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 2 of 9

<u>Biological Hazard</u>	: Ethanol is rapidly oxidized in the body to acetaldehyde, then to acetate, and finally to carbon dioxide and water; un-oxidized alcohol is excreted in the urine and expired in the air. ^{8,9}
<u>Reproductive hazard</u>	: Some evidence of foetotoxicity ²⁶⁻²⁸ and teratogenicity ²⁹ has been observed in experimental animals treated with high doses of ethanol during gestation. Alcohol may induce spontaneous abortions, may impair fertility, may cause harm to the unborn child and may cause harm to breast fed babies. The reproductive hazards have been determined after repeated excessive consumption of ethanol; these effects are not likely to occur through exposure below the Occupational Exposure Limits in the working environment.
<u>Health effects – eyes</u>	: Moderately irritating. Exposure to liquid, vapours, fumes or mist may cause irritation. Direct contact may cause irritation, redness, pain, corneal inflammation and possible corneal damage.
<u>Health effects – skin</u>	: Repeated or prolonged contact may result in defatting, redness, pain, itching, inflammation, cracking and possible secondary infection. Repeated skin contact may result in allergic skin reaction in a very small proportion of individuals.
<u>Health effects – ingestion</u>	: Large doses lead to alcohol poisoning while repeated ingestion can lead to alcoholism. Alcohol abuse and dependence can have a profound effect on work performance and tendency to accidents at work. ¹¹⁻¹³ The presence of denaturants, e.g. Methanol, pyridines, and benzene in industrial alcohol greatly increase the toxicity on ingestion. Ethanol drinking is also suspected of increasing the toxic effect of other chemicals encountered in the laboratory and the workplace by inhibition of their metabolism or excretion ¹⁴ ; e.g. 1, 1, 1 –Trichloroethane ¹⁵ , Xylene, Trichloroethylene and Dimethylformamide ¹⁶ , Benzene ¹⁷ and Lead. ^{18,19} May cause harmful central nervous system effects. Effects may include excitation, euphoria, headache, dizziness, drowsiness, blurred vision, fatigue, tremors, convulsions, loss of consciousness, coma, respiratory arrest and death. Severe acute intoxication may cause Hypoglycaemia, Hypothermia and extensor rigidity. Prolonged or frequent contact may result in liver injury.
<u>Health effects – inhalation</u>	: Intoxicating if continuously inhaled for a long period of time. Occupational Exposure Limits (8-hour reference period) 1000ppm (1900mg/m ³). ³⁰
<u>Carcinogenicity</u>	: Long-term consumption of alcoholic beverages demonstrates an increase in the occurrence of breast cancer and colorectal cancer. Malignant tumours of the oral cavity, Pharynx, Larynx, Oesophagus and Liver is also causally related to the consumption of alcoholic beverages. ³¹ Some studies ^{20,21} have shown an excess incidence of laryngeal cancer over the expected from exposure to synthetic alcohol, with Diethyl Sulphate probably being the causative agent.
<u>Mutagenicity</u>	: Ethanol has been found to be non- mutagenic in the <i>Salmonella</i> microsome test, ²² but some transient mutagenic changes have been observed in male, but not female, mice treated with rather large doses. ²³⁻²⁵ Ethanol is mutagenic in man via its first metabolite, Acetaldehyde. Acetaldehyde induces chromosomal aberrations, sister-chromatid exchanges and cross-links between DNA strands. ³²
<u>Neurotoxicity</u>	: Over exposure may cause Central Nervous System (CNS) depression.

4. First – aid Measures:

<u>Product in eye</u>	: Flush immediately with water or neutral saline solution for at least 15 minutes. Seek medical attention.
<u>Product on skin</u>	: Remove contaminated clothing and rinse contaminated area with soap and water. If skin irritation persists seek medical attention.

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 3 of 9

<u>Product ingested</u>	: If victim is conscious, give 1-3 glasses of water or milk to dilute stomach contents. If spontaneous vomiting occurs, or when vomiting is induced, monitor for breathing difficulty. Do not make an unconscious or semi – conscious person vomit. Keep affected person warm at rest. Get medical attention for substantial ingestions and/or gastrointestinal symptoms.
<u>Product inhaled</u>	: Remove the victim to fresh air. If not breathing, ensure open airway and institute cardiopulmonary resuscitation (CPR). If breathing is weak, irregular or has stopped apply artificial respiration. Oxygen may be beneficial. Keep affected person warm and at rest. Get immediate medical attention.

5. Fire – fighting Measures:

<u>Extinguishing media</u>	: Use dry chemical, alcohol foam or carbon dioxide to extinguish fire. Water may be ineffective but should be used to cool fire- exposed containers, structures and to protect personnel. If leak or spill has not ignited, ventilate area and use water spray to disperse gas or vapour and to protect personnel attempting to stop a leak. Use water to dilute spills and to flush them away from sources of ignition. Do not flush down public sewers or other drainage systems.
<u>Special hazards</u>	: Flammable Flash point : 12 - 16°C Flammability/explosion limits : 3, 3 – 19% ^{v/v} Dangerous when exposed to heat or flame. Vapours form flammable or explosive mixtures with air at room temperature. Vapour or gas may spread to distant ignition sources and flash back. Run – off to sewer may cause fire or explosion hazard. Containers may explode in heat of fire. Vapours may concentrate in confined areas. Irritating or toxic substances may be emitted upon thermal decomposition.
<u>Protective clothing</u>	: Exposed fire fighters should wear approved self-contained breathing apparatus with full face mask and full protective equipment.

6. Accidental Release Measures:

<u>Personal precautions</u>	: Protective clothing should be worn to prevent excessive skin contact.
<u>Environmental precautions</u>	: Prevent liquid entering sewers. Do not allow to enter surface waters, storm drains, etc.
<u>Small spills</u>	: Take immediate steps to stop and contain the spill. Caution should be exercised regarding personnel safety and exposure to be spilled material. Eliminate all sources of ignition and wear protective clothing. Absorb small spills onto paper towels and evaporate in a safe place e.g. in a fume hood. Flush the contaminated area with plenty of water.
<u>Large spills</u>	: Stop leak if you can do it without risk. Contact your local fire department. Eliminate all sources of ignition and static; restrict access to area until completion of clean-up procedure. Wear adequate protective equipment, use self-contained breathing apparatus in confined poorly-ventilated areas. Large quantities should be absorbed on to sand, vermiculite or an equivalent absorbent material and removed to a safe area for disposal. Flush the contaminated area with plenty of water. Incineration is the recommended method of disposal.

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 4 of 9

7. Handling and Storage:

Suitable material : Ethanol is not corrosive to metals and may be stored in stainless steel, mild steel or aluminium containers. Ethanol may also be stored in HDPE containers.

Handling/ storage precautions : Ground lines and equipment used during transfer to reduce the possibility of static spark-initiated fire or explosion. Store in approved flammable liquid storage containers. Keep containers tightly closed as this material readily absorbs moisture. Store away from incompatible materials. Store in a cool, dry well-ventilated area away from sparks, flames and other sources of ignition. Eliminate all sources of static electricity. Use non-sparking electrical and ventilation systems. Storage criteria: Flammable Liquid store

8. Exposure Control / Personal Protection:

Occupational exposure limits :

Country	8 Hour – TWA Hygiene Limit	STEL
US (OSHA)	1900 mg/m ³ (1000ppm)	None
US (ACGIH)	1900 mg/m ³ (1000ppm)	None
Germany (MAK)*	960 mg/m ³ (500ppm)	Peak limit cat. II,1
UK (OES)	1920 mg/m ³ (1000ppm)	None
Slovak Republic	960 mg/m ³ (500ppm)	1920 mg/m ³ (1000ppm) (30 min, 4x per shift)
Czech Republic	1000 mg/m ³	3000 mg/m ³

Engineering control measures : Engineering control methods to reduce hazardous exposures are preferred. General methods include mechanical ventilation (dilution and local exhaust), process or personnel enclosure, control of process conditions and process modification (e.g. substitution of a less hazardous material). Administrative controls and personal protective equipment may also be required. Use a non-sparking, grounded ventilation system separate from other exhaust ventilation systems. Exhaust directly to the outside. Supply sufficient replacement air to make up for air removed by exhaust system.

Personal protection – respiratory : If exposure limits are exceeded or if irritation is experienced, an approved respirator for organic vapours is generally acceptable. For high concentrations and for oxygen-deficient atmospheres, use approved air-supplied respirator. Full respiratory protection should be readily available in case of spillage.

Personal protection – hand : Rubber (Butyl) or neoprene gloves are recommended.

Personal protection – eye : Prevent eye contact with this material. Wear chemical tight safety goggles where eye exposure is reasonably probable. Provide an eyewash station immediately accessible to the work area. Contact lenses should not be worn when working with this chemical.

Personal protection – skin : Avoid skin contact. When working with this substance, wear appropriate chemical protective gloves. Depending upon conditions of use, additional protection may be necessary such as face shield, apron, etc.

Other protection : Provide a safety shower immediately accessible to the work area.

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) <i>Ethanol (C₂H₅OH)</i>	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 5 of 9

9. Physical and Chemical Properties:

Appearance	: Colourless, volatile liquid
Odour	: Characteristic pleasant odour
pH	: Neutral
Boiling point	: 78.2°C - 78.5°C
Melting point	: - 130°C to - 112°C
Flash point	: 12°C - 16°C
Flammability	: 3, 3 – 19% v/v
Auto-flammability	: 363°C
Explosive properties	: Vapours can form explosive mixtures with air. All sources of ignition or static must be excluded.
Oxidizing properties	: None
Vapour pressure	: 59 mm Hg at 20°C
Density	: 785.3 kg/m ³ – 809 kg/m ³ at 25°C
Solubility – water	: Miscible with water in all proportions
Solubility – solvent	: Miscible with ether, methanol, chloroform and acetone
Solubility – coefficient	: 1100 @ 37°C ³³

10. Stability and Reactivity:

<u>Condition to avoid</u>	: Overheating, flames, sources of ignition or static electricity. Oxidizing agents. Vapour/ air mixtures are explosive.
<u>Incompatible materials</u>	: See section 3 (chemical hazards).
<u>Hazardous decomposition products:</u>	Incomplete combustion can generate carbon monoxide and carbon dioxide.

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 6 of 9

11. Toxicological Information:

Acute toxicity	:	<u>Short-term hazards</u>
		Acute oral toxicity Ethanol : LD ₅₀ rat: 7,060 mg/kg; literature value
		Acute inhalation toxicity Ethanol : LC ₅₀ rat: 66,000 mg/l; literature value; 4 h
		Acute dermal toxicity Ethanol : LDLo rabbit: 20,000 mg/kg; literature value
		NOAEL - 2400 mg/kg (2%) - for rats
		LOAEL – 3600 mg/kg (3%) - for rats
Skin and eye contact	:	Redness, pain (refer to Section 3 for further information)
Chronic toxicity	:	Refer to Section 3
Carcinogenicity	:	Refer to Section 3
Mutagenicity	:	Refer to Section 3
Neurotoxicity	:	Refer to Section 3
Reproductive hazards	:	Refer to Section 3

12. Ecological Information:

Aquatic toxicity – fish	:	In high concentration it harms fish and plankton; LC ₅₀ (fish, 96 hours) – 15.3 mg/L (Pimephales promelas)
Aquatic toxicity – daphnia	:	Threshold for deleterious effects in small crustaceans upwards of 7.800 mg/l; EC ₅₀ (Daphnia, 48 hours) – 5012 mg/L (Ceriodaphnia dubia)
Aquatic toxicity – algae	:	Toxic threshold concentration: <i>Pseudomonas putida</i> upwards of 6.500mg/l, <i>Scenedesmus quadricauda</i> upwards of 5.000mg/l, <i>Microsystis aeruginosa</i> upwards of 1.450ml/L IC ₅₀ (algae, 72 hours) – 275 mg/L
Biodegradability	:	This product is readily biodegradable. Ethanol is widely recognized as being readily biodegradable in the environment as it is both a metabolite of and nutrient for microbes. There are no persistent
Bio – accumulation	:	This product is not expected to bio accumulate through the food chains in the environment. The very low log KOW of –0.31 is indicative of a low bioaccumulation potential.
Mobility	:	This product is likely to volatilize rapidly into the air because of its high vapour pressure. The product is poorly absorbed onto soils or sediments. Adsorption coefficient (K _{OC}) solid phase/liquid phase = 1 (highly mobile)
German wgk	:	1 (low hazard to water)

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 7 of 9

13. Disposal Considerations:

Disposal methods : Only under conditions approved by local authorization. See also Section 6.

Disposal of packaging : Empty containers may contain flammable and hazardous residues. Always obey hazard warnings.

14. Transport Information:

UN No : 1170

Substance Identity No : UN 1170

ADR/RID class : 3

ADR/RID item No : 3(b)

ADR/RID hazard identity No : 3

IMDG – shipping name : Ethanol

IMDG – class : **3**

IMDG – packaging group : II

IMDG – marine pollutant : Not a marine pollutant

IMDG – EMS No : F-E, S-D

IMDG – MFAG table No : 3074

IATA – shipping name : Ethanol Solutions

IATA – class : 3

IATA – subsidiary risk(s) : Flammable liquid

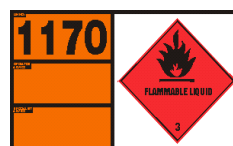
ADNR – class : UN –No.:1170; Class 3, Packaging Group II

UK – description : Not available

UK- emergency action class : Not available

UK – classification : Not available

Tremcard No : 1170



MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 8 of 9

15. Regulatory Information:

EEC hazard classification	:	200 – 578 - 6
Risk phases	:	R11
Safety phases	:	S2, S7, S9, S16, S33
National legislation	:	Hazardous Substances Act 15 of 1973 and Regulations Occupational Health and Safety Act 85 of 1993 (Hazardous Chemical Substances Regulations)
International Legislation	:	IATA Dangerous Goods Regulation (DGR) 55th Edition 2014

IMDG Code, International Maritime Dangerous Goods Code, 2008 Edition, Volume 1 and 2

16. Sources of Information

1. Chemical Safety Data Sheets Volume 1 - Royal Society of Chemistry Information Services (Numbers in parenthesis refer to this article, see below).
2. Hazardous Chemicals Data Book, Environmental Health Review No. 4 Edited by G. Weiss.
3. Canadian Centre for Occupational Health and Safety. Record No. 516022

17. Other Information

1. *The information above is believed to be accurate and represents the best information currently available to us. However, we make no warranty of merchantability or any other warranty, express or implied, with respect to such information, and we assume no liability resulting from its use. Users should make their own investigations to determine the suitability of the information for their particular purposes. In no event shall NCP Alcohols be liable for any claims, losses, or damages of any third party or for lost profits or any special, indirect, incidental, consequential or exemplary damages, howsoever arising, even if NCP Alcohols has been advised of the possibility of such damages.*
2. *This product may be denatured upon request with small quantities ($\leq 5\% \text{ v/v}$) of one or more of the following denaturants: Menthol (CAS No: 2216-51-5), Denatonium Benzoate (Bitrix) (CAS No:3734-33-6), Propylene Glycol (CAS No: 57-55-6), Iso-propyl alcohol (CAS No:67-63-0), Methanol (CAS No: 67-56-1), Wood Naphtha (CAS No: 67-56-1), Di-ethyl Phthalate (DEP) (CAS No: 84-66-2), Hibitane (CAS No: 82432-16-4) or Butanol (CAS No: 71-36-3) or formulations as per the Specialised Denaturants list in the Industrial*

18. Change Details

Revision: 2.0	<ul style="list-style-type: none"> - Changed MSDS Format - Updated contents to include current information available
Revision 3.0	<ul style="list-style-type: none"> - Included international reference to IATA Dangerous Goods Regulation (DGR) 55th Edition 2014 - Include CAS numbers for denaturants
Revision 4.0	<ul style="list-style-type: none"> - Updated IMDG class in accordance with IMDG Code, 2008 Edition. - Included reference to IMDG Code, 2008 Edition

MATERIALS SAFETY DATA SHEET (MSDS) Ethanol (C₂H₅OH)	MSDS Number	NCP/P/1
	Version number	Version 4.0
	Date issued	11 th February 2016
	Next Review date	February 2018
	Page No.	Page 9 of 9

19. References

1. *Chem. Saf. Summ.* 1984, **55**(219), 62
2. Bretherick, L. *Handbook of Reactive Chemical Hazards* (3rd edition)
3. *Univ. Saf. Asscn. Saf. News* 1982, (16)
4. *Laboratory Hazards Bulletin* 1982, 584
5. *Laboratory Hazards Bulletin* 1983, 113
6. Pratt, E.F.; et al. *J. Am. Chem. Soc.* 1954, **75**, 54
7. Braendstrom, A. *Acta Chem. Scand.* 1951, **4**, 1608-1010
8. Wimer, W.W.; et al. *Alcohols Toxicology* (Noyes Data, 1983)
9. Henson, E.V. *JOM, J. Occup. Med.* 1960, **2**, 497
10. Lester, D.; Greenberg, L.A. *J. Stud. Alcohol.* 1951, **12**, 167
11. *Encyclopedia of Occupational Health & Safety* ILO. Ethyl Alcohol and Alcoholism
12. Emery, M. *Occup. Saf. Health* 1979, **9**(9), 8-13
13. Madden, J.S. *J. Soc. Occup. Med.* 1976, **26**(2), 61-64
14. Christensen, J.M. *Acta, Pharmacol. Toxicol.* 1983, **53**, Suppl. II
15. Woolverton, W.L.; Balster, R.L. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1981, **59**(1), 1-7
16. Riihimaki, V.; et al. *Scand. J. Work, Environ. Health* 1982, **8**(1), 77-79
17. Baarson, K.A.; et al. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 1982, **64**(3), 393-404
18. Munoz, P.J.; et al. *Rev. Med.* 1984, **22**(2), 79-83
19. Ito, Y.; et al. *J. Sci. Labour* 1984, **60**(6), 255-267
20. Lynch, J.; et al. *JOM, J. Occup. Med.* 1979, **21**(5), 333-341
21. Tuyns, A.J.; et al. *Int. J. Cancer* 1979, **23**(4), 443-447
22. McCann, J.; et al. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1975, **72**(12), 5135
23. Badr, F.M.; R.S. *Nature* 1975, **253**, 134
24. Machemer, L.; D. *Mutat. Res.* 1975, **29**, 209
25. Chaubey, R.C.; et al. *Mutat. Res.* 1977, **43**, 441
26. Tze, W.J.; Lee, M. *Nature* 1975, **257**, 479
27. Skosyeva, A.M. *Akush. Ginek.* 1973, **4**, 15
28. Schwetz, B.A.; et al. *Teratology* 1978, **18**(3), 385
29. Hemminki, K.; Viriei, P. *Teratog. Carcinog. Mutagen.* 1985, **5**(4), 251-318
30. [www_static.shell.com/ethanol_CAS_64_1_5_gb_stl1.pdf](http://www.static.shell.com/ethanol_CAS_64_1_5_gb_stl1.pdf)
31. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization. (1988). *Alcohol drinking*. Lyon: [World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. ISBN 92-832-1244-4. http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol44/volume44.pdf](http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol44/volume44.pdf). p8
32. www.inchem.org/documents/sids/sids/64175.pdf
33. Toxicity and risks induced by Occupational Exposure to chemical compounds Pg.259.

Compiled By: D.D. Liebenberg

Reviewed and updated by: L. Mudaly (SHEQ Manager)

Approved By: G. Bregovits

SAFETY DATA SHEET

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

Product identifier

Product name: Eastman(TM) Acetaldehyde

Product No.: EAN 900468. P0016000

Synonyms, Trade Names: 00160-00

Additional identification

Chemical name: acetaldehyde
CAS-No.: 75-07-0

Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses: Chemical Intermediate

Uses advised against: None known.

Details of the supplier of the safety data sheet**Manufacturer / Supplier**

Eastman Chemical Company
200 South Wilcox Drive
Kingsport, TN 37660-5280 US
+14232292000

Visit our website at www.EASTMAN.com or email emnmsds@eastman.com

Emergency telephone number:

For emergency health, safety, and environmental information, call 1-423-229-4511 or 1-423-229-2000.

For emergency transportation information, in the United States: call CHEMTREC at 800-424-9300 or call 423-229-2000.

SECTION 2: Hazards identification

Hazard Classification:**Physical Hazards**

Flammable liquids Category 1

Health Hazards

Acute toxicity (Oral) Category 4
Serious Eye Damage/Eye Irritation Category 2A
Carcinogenicity Category 2
Specific Target Organ Toxicity -
Single Exposure Category 3

OSHA Specified Hazards: not applicable

Warning label items including precautionary statement:

Pictogram:



Signal Words: DANGER!

Hazard Statement(s): H224: Extremely flammable liquid and vapor.
H302: Harmful if swallowed.
H319: Causes serious eye irritation.
H335: May cause respiratory irritation.
H351: Suspected of causing cancer.

Precautionary Statement:

Prevention: P201: Obtain special instructions before use.
P264: Wash hands thoroughly after handling.
P202: Do not handle until all safety precautions have been read and understood.
P210: Keep away from heat/sparks/open flames/hot surfaces. No smoking.
P233: Keep container tightly closed.
P240: Ground/bond container and receiving equipment.
P241: Use explosion-proof electrical/ventilating/lighting/equipment.
P242: Use only non-sparking tools.
P243: Take precautionary measures against static discharge.
P280: Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.
P270: Do not eat, drink or smoke when using this product.
P261: Avoid breathing dust/fume/gas/mist/vapors/spray.
P271: Use only outdoors or in a well-ventilated area.

Response: P308+P313: IF exposed or concerned: Get medical advice/attention.
P370 + 378: In case of fire: Use water spray, carbon dioxide, dry chemical or foam for extinction.
P301+P312: IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER or doctor/physician if you feel unwell.
P330: Rinse mouth.
P305+P351+P338: IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
P337+P313: If eye irritation persists: Get medical advice/attention.
P304+P340: IF INHALED: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing.
P312: Call a POISON CENTER or doctor/physician if you feel unwell.
P303+P361+P353: IF ON SKIN (or hair): Remove/take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/shower.

Storage: P403+P233: Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed.
P405: Store locked up.

Disposal: P501: Dispose of contents/container to an appropriate treatment and disposal facility in accordance with applicable laws and regulations, and product characteristics at time of disposal.

Hazard(s) not otherwise classified (HNOC):

May polymerize resulting in hazardous condition. Peroxide former.

SECTION 3: Composition/information on ingredients

Substances / Mixtures

General information:

Chemical name	Concentration	Additional identification	Notes
acetaldehyde	100%	CAS-No.: 75-07-0	#

* All concentrations are percent by weight unless ingredient is a gas. Gas concentrations are in percent by volume.

This substance has workplace exposure limit(s).

SECTION 4: First aid measures

Description of first aid measures

Inhalation: Move to fresh air. If breathing stops, provide artificial respiration. If breathing is difficult, give oxygen. Get medical attention immediately.

Eye contact: Immediately flush with plenty of water for at least 15 minutes. If easy to do, remove contact lenses. Get medical attention. In case of irritation from airborne exposure, move to fresh air. Get medical attention if symptoms persist.

Skin contact: Immediately flush with plenty of water for at least 15 minutes while removing contaminated clothing and shoes. Get medical attention. Wash contaminated clothing before reuse. Destroy or thoroughly clean contaminated shoes.

Ingestion: Call a physician or poison control center immediately. Only induce vomiting at the instruction of medical personnel. Never give anything by mouth to an unconscious person.

Most important symptoms and effects, both acute and delayed: May irritate and cause redness and pain. Symptoms may be delayed.

Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

Hazards: None known.

Treatment: Treat symptomatically.

SECTION 5: Firefighting measures

General Fire Hazards: Extremely flammable liquid and vapor - vapor may cause flash fire.

Extinguishing media

Suitable extinguishing media: Water spray. Dry chemical. Carbon Dioxide. Alcohol foam.

Unsuitable extinguishing media: None known.

Special hazards arising from the substance or mixture:	Vapors may cause a flash fire or ignite explosively. Vapors may travel considerable distance to a source of ignition and flash back. Prevent buildup of vapors or gases to explosive concentrations. Fire or excessive heat may result in rupture of container due to bulk polymerization. Heating may cause an explosion. May form explosive peroxides.
Advice for firefighters	
Special fire fighting procedures:	Water may be ineffective in fighting the fire. Use water spray to keep fire-exposed containers cool.
Special protective equipment for fire-fighters:	Self-contained breathing apparatus and full protective clothing must be worn in case of fire.

SECTION 6: Accidental release measures

Personal precautions, protective equipment and emergency procedures:	Wear appropriate personal protective equipment.
Environmental Precautions:	Avoid release to the environment.
Methods and material for containment and cleaning up:	Eliminate sources of ignition. Absorb spill with vermiculite or other inert material, then place in a container for chemical waste. Large Spillages: Use water spray to disperse vapors and dilute spill to a nonflammable mixture. Prevent runoff from entering drains, sewers, or streams. Dike for later disposal.
Notification Procedures:	In the event of a spill or accidental release, notify relevant authorities in accordance with all applicable regulations.

SECTION 7: Handling and storage:

Precautions for safe handling:	Avoid breathing mists or vapors. Avoid contact with eyes, skin, and clothing. Do not taste or swallow. Use only with adequate ventilation. Wash thoroughly after handling. Do not expose to air. After opening, purge container with nitrogen before reclosing. If peroxide formation is suspected, do not open or move container. Do not distill to near dryness. Periodically test for peroxide formation on long-term storage. Addition of water or appropriate reducing materials will lessen peroxide formation.
Conditions for safe storage, including any incompatibilities:	Keep away from food, drink and animal feeding stuffs. Keep container tightly closed and in a well-ventilated place. Store away from heat and light. Store in a cool place.
Specific end use(s):	Chemical Intermediate

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

Control Parameters

Occupational Exposure Limits

Country specific exposure limits have not been established or are not applicable unless listed below.

Chemical name	type	Exposure Limit Values	Source
acetaldehyde; ethanal	Ceiling	25 ppm	US. ACGIH Threshold Limit Values (01 2010)
	PEL	200 ppm 360 mg/m3	US. OSHA Table Z-1 Limits for Air Contaminants (29 CFR 1910.1000) (02 2006)

Exposure controls**Appropriate engineering controls:**

Good general ventilation (typically 10 air changes per hour) should be used. Ventilation rates should be matched to conditions. If applicable, use process enclosures, local exhaust ventilation, or other engineering controls to maintain airborne levels below recommended exposure limits. If exposure limits have not been established, maintain airborne levels to an acceptable level.

Individual protection measures, such as personal protective equipment**General information:**

Eye bath. Washing facilities. Safety shower.

Eye/face protection:

Wear safety glasses with side shields (or goggles). Wear a full-face respirator, if needed.

Skin protection**Hand Protection:**

Wear chemical-resistant gloves, footwear, and protective clothing appropriate for the risk of exposure. Contact health and safety professional or manufacturer for specific information.

Other:

No data available.

Respiratory Protection:

If engineering controls do not maintain airborne concentrations below recommended exposure limits (where applicable) or to an acceptable level (in countries where exposure limits have not been established), an approved respirator must be worn. In the United States of America, if respirators are used, a program should be instituted to assure compliance with OSHA Standard 63 FR 1152, January 8, 1998. Respirator type: Air-purifying respirator with an appropriate, government approved (where applicable), air-purifying filter, cartridge or canister. Contact health and safety professional or manufacturer for specific information.

Hygiene measures:

Observe good industrial hygiene practices.

Environmental Controls:

No data available.

SECTION 9: Physical and chemical properties**Information on basic physical and chemical properties****Appearance****Physical state:**

liquid

Form:

liquid

Color:

Colorless

Odor:

Pungent

Odor Threshold:

0.05 ppm

pH:

No data available.

Melting Point

-123 °C

Boiling Point:	21 °C
Flash Point:	-39 °C (Tag closed cup)
Evaporation Rate:	Not determined.
Flammability (solid, gas):	No data available.
Flammability Limit - Upper (%):	No data available.
Flammability Limit - Lower (%):	No data available.
Vapor pressure:	532 mbar (5 °C)
Vapor density (air=1):	1.5
Specific Gravity:	0.788 (20 °C)
Solubility(ies)	
Solubility in Water:	Completely Soluble
Solubility (other):	No data available.
Partition coefficient (n-octanol/water):	Pow: 2.7 log Pow: 0.43
Autoignition Temperature:	No data available.
Decomposition Temperature:	Thermal stability not tested. Low stability hazard expected at normal operating temperatures.
Dynamic viscosity:	No data available.
Kinematic viscosity:	Not determined.
Explosive properties:	No data available.
Oxidizing properties:	No data available.
Other information	
Minimum ignition temperature:	149 °C (ASTM D2155)

SECTION 10: Stability and reactivity

Reactivity:	None known.
Chemical Stability:	Stable
Possibility of Hazardous Reactions:	Materials containing similar functional groups form explosive peroxides. Hazardous Polymerization
Conditions to Avoid:	Avoid heat, sparks, flame and high pressure.
Incompatible Materials:	Strong oxidizing agents. Accelerators. Initiators. Contamination. Polymerization initiators.
Hazardous Decomposition Products:	Carbon Dioxide. Carbon Monoxide.

SECTION 11: Toxicological information

Information on likely routes of exposure

Inhalation:	Irritating to respiratory system.
Ingestion:	Harmful if swallowed.
Skin contact:	None known.
Eye contact:	Causes serious eye irritation.

Information on toxicological effects**Oral**

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
Oral LD-50: (Rat): 1,930 mg/kg
Oral LD-50: (Rat): 661 mg/kg

Dermal

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
Dermal LD-50: (Rabbit): 3,540 mg/kg

Inhalation

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
LC50 (Rat, 4 h): 13300 ppm

Repeated dose toxicity

Product: No data available.

Skin Corrosion/Irritation

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
(Rabbit, 24 h): Slight

Serious Eye Damage/Eye Irritation

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
(Rabbit): Severe

Respiratory or Skin Sensitization

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
(Guinea Pig) Not a skin sensitizer.

Carcinogenicity

Product: No data available.

Specified substance(s):
acetaldehyde; ethanal
IARC 2B: possibly carcinogenic to humans. NTP reasonably anticipated to be a carcinogen. OSHA Not Listed.

Toxicity to reproduction

Product: No data available.

Developmental toxicity

Product: No data available.

Germ Cell Mutagenicity**In vitro**

Product: No data available.

In vivo

Product: No data available.

Specific Target Organ Toxicity - Single Exposure

Product: No data available.

Specific Target Organ Toxicity - Repeated Exposure

Product: No data available.

Aspiration Hazard

Product: No data available.

Other effects: No data available.

SECTION 12: Ecological information**Ecotoxicity:****Acute hazards to the aquatic environment:****Fish**

Product: No data available.

Specified substance(s):

acetaldehyde; ethanal LC-50 (Bluegill Sunfish, 96 h): 53 mg/l
LC-50 (golden orfe, 48 h): 124 - 140 mg/l

Aquatic Invertebrates

Product: No data available.

Specified substance(s):

acetaldehyde; ethanal EC-50 (daphnid, 48 h): 57.4 mg/l

Chronic hazards to the aquatic environment:**Fish**

Product: No data available.

Aquatic Invertebrates

Product: No data available.

Toxicity to Aquatic Plants

Product: No data available.

Specified substance(s):

acetaldehyde; ethanal

EC-50 (Algae (*Pseudokirchneriella subcapitata*), 72 h): > 100 mg/l**Persistence and Degradability****Biodegradation****Product:** No data available.**BOD/COD Ratio****Product:** No data available.**Bioaccumulative Potential****Bioconcentration Factor (BCF)****Product:** No data available.**Partition Coefficient n-octanol / water (log Kow)****Product:** Log Kow: 0.43**Mobility in Soil:** No data available.**Other Adverse Effects:** No data available.**SECTION 13: Disposal considerations****Waste treatment methods****General information:** No data available.**Disposal methods:** Dispose of waste and residues in accordance with local authority requirements. Mix with compatible chemical which is less flammable and incinerate. Since emptied containers retain product residue, follow label warnings even after container is emptied. Residual vapors may explode on ignition; do not cut, drill, grind, or weld on or near this container.**SECTION 14: Transport information**

Important Note: Shipping descriptions may vary based on mode of transport, quantities, package size, and/or origin and destination. Consult your company's Hazardous Materials/Dangerous Goods expert for information specific to your situation.

DOT

Reportable Quantity: 454 kg (acetaldehyde)

Possible Shipping Description(s):

UN 1089 Acetaldehyde 3 I

IMDG - International Maritime Dangerous Goods Code

Possible Shipping Description(s):

UN 1089 ACETALDEHYDE 3 I

IATA

Possible Shipping Description(s):

UN 1089 Acetaldehyde 3 I

SECTION 15: Regulatory information

Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture.:

This product has been classified in accordance with hazard criteria of the Controlled Products Regulations and the SDS contains all the information required by the Controlled Products Regulations.

WHMIS (Canada) Status: controlled

WHMIS (Canada) Hazard Classification: B/2, D/2/A, D/2/B

SARA 311-312 Hazard Classification(s):

immediate (acute) health hazard

delayed (chronic) health hazard

fire hazard

reactive hazard

US EPCRA (SARA Title III) Section 313 - Toxic Chemical List

ACETALDEHYDE

OSHA: hazardous

TSCA (US Toxic Substances Control Act): This product is listed on the TSCA inventory. Any impurities present in this product are exempt from listing.

DSL (Canadian Domestic Substances List) and CEPA (Canadian Environmental Protection Act): This product is listed on the DSL. Any impurities present in this product are exempt from listing.

AICS / NICNAS (Australian Inventory of Chemical Substances and National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme): This product is listed on AICS or otherwise complies with NICNAS.

MITI (Japanese Handbook of Existing and New Chemical Substances): This product is listed in the Handbook or has been approved in Japan by new substance notification.

SECTION 16: Other information

HMIS® Hazard Ratings: Health - 2*, Flammability - 4, Chemical Reactivity - 2

HMIS® rating involves data interpretations that may vary from company to company. They are intended only for rapid, general identification of the magnitude of the specific hazard. To deal adequately with the safe handling of this material, all the information contained in this MSDS must be considered.

Revision Information: Not relevant.

Key literature references and sources for data: No data available.

Training information: No data available.

Issue Date: 05/14/2015

SDS No.:

Disclaimer: This information is provided without warranty. The information is believed to be correct. This information should be used to make an independent determination of the methods to safeguard workers and the environment.



Ethyl Acetate

SECTION 1 IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/MIXTURE AND OF THE COMPANY/UNDERTAKING

Trade name	Ethyl Acetate		
Synonyms	Acetidin, Acetic acid ethyl ester, Ethyl acetic ester		
Use	Flavors and Fragrances, Industrial use, Intermediate, Paint and Coatings, Pharmaceutical, Process/Extraction Solvent, Process material, Raw material for chemical processes, Raw material for industry, Raw material for pharmaceuticals, Solvent		
Company	Sasol Chemicals (USA) LLC (an affiliate of Sasol Chemicals North America LLC)		
Address	12120 Wickchester Lane Houston TX 77079		
Telephone	CHEMTREC North America Transportation Emergency (24-hr)	(800) 424-9300	
	CHEMTREC World Wide	(703) 527-3887	
	Other Emergencies (24-hr)	(337) 494-5142	
	MSDS and Product Information (8:00am-4:30pm CST)	(281) 588-3491	
	Health and Safety Information (7:30am-4:00pm CST)	(281) 588-3492	
E-mail address	SasolElectronicSDS@us.sasol.com		

SECTION 2 HAZARDS IDENTIFICATION

GHS Hazards

Flammable liquids	Category 2
Eye irritation	Category 2A
Specific target organ toxicity - single exposure	Category 3 (Narcotic effects)

LABEL ELEMENTS

Hazard symbols



Signal word Danger

Hazard statements H225 Highly flammable liquid and vapour.
H319 Causes serious eye irritation.
H336 May cause drowsiness or dizziness.

Precautionary statements

Prevention P210 Keep away from heat/sparks/open flames/hot surfaces. - No smoking.
P233 Keep container tightly closed.
P240 Ground/bond container and receiving equipment.
P241 Use explosion-proof electrical/ ventilating/ lighting/ equipment.

Ethyl Acetate

- P242 Use only non-sparking tools.
P243 Take precautionary measures against static discharge.
P280 Wear protective gloves/ eye protection/ face protection.
P264 Wash skin thoroughly after handling.
P261 Avoid breathing dust/ fume/ gas/ mist/ vapours/ spray.
P271 Use only outdoors or in a well-ventilated area.

Response P303 + P361 + P353 IF ON SKIN (or hair): Remove/ Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/ shower.
P370 + P378 In case of fire: Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide for extinction.
P305 + P351 + P338 IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
P337 + P313 If eye irritation persists: Get medical advice/ attention.
P304 + P340 IF INHALED: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing.
P312 Call a POISON CENTER or doctor/ physician if you feel unwell.

Storage P403 + P405 + P235 Store locked up in a well-ventilated place. Keep cool.

SECTION 3 COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

<u>Components</u>	<u>CAS-No.</u>	<u>Weight percent</u>
Ethyl Acetate	141-78-6	100

See Section 8 for Exposure Guidelines and Section 15 for Regulatory Classifications.

SECTION 4 FIRST AID MEASURES

- Eye contact** Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes and consult a physician.
- Skin contact** Wash off immediately with soap and plenty of water while removing all contaminated clothes and shoes. When symptoms persist or in all cases of doubt seek medical advice. Wash contaminated clothing before re-use.
- Inhalation** Remove to fresh air. If breathing is irregular or stopped, administer artificial respiration. In case of shortness of breath, give oxygen. Call a physician immediately.
- Ingestion** If swallowed, call a poison control centre or doctor immediately. Do not induce vomiting without medical advice. Never give anything by mouth to an unconscious person.

SECTION 5 FIREFIGHTING MEASURES

FLAMMABLE PROPERTIES

Fire/explosion Vapours may form explosive mixture with air. Flash back possible over considerable distance. Use water spray to disperse the vapors. NFPA Class IB flammable liquid.

Ethyl Acetate

Suitable extinguishing media	Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.
Protective equipment and precautions for firefighters	In the event of fire, wear self-contained breathing apparatus.
Further information	Keep containers and surroundings cool with water spray. Beware of vapours accumulating to form explosive concentrations. Vapours can accumulate in low areas.

SECTION 6 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Methods and materials for containment and cleaning up	Evacuate personnel to safe areas. Remove all sources of ignition. Contain spillage, and then collect with non-combustible absorbent material, (e.g. sand, earth, diatomaceous earth, vermiculite) and place in container for disposal according to local / national regulations (see section 13). Do not flush into surface water or sanitary sewer system.
--	---

SECTION 7 HANDLING AND STORAGE

Safe handling advice	Ensure all equipment is electrically grounded before beginning transfer operations. Keep away from heat and sources of ignition.
Storage/Transport pressure	Ambient
Load/Unload temperature	Ambient

SECTION 8 EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

ENGINEERING MEASURES

Air contaminant levels should be controlled below the PEL or TLV for this product (see Exposure Guidelines). Ensure adequate ventilation, especially in confined areas. Use explosion-proof equipment.

PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT

Eyes	Chemical resistant goggles must be worn., Face-shield
Skin	Wear suitable protective clothing, gloves and eye/face protection.
Inhalation	Respiratory protection is normally not required except in emergencies or when conditions cause excessive airborne levels of mists or vapors. Use NIOSH approved respiratory protection.

EXPOSURE GUIDELINES

<u>Components</u>	<u>Exposure limit(s)</u>
Ethyl Acetate	ACGIH TLV (8-hour) 400 ppm 1,400 mg/m ³ OSHA PEL 400 ppm 1,400 mg/m ³

Ethyl Acetate

PEL= Permissible Exposure Limits
TLV= Threshold Limit Value
EL= Excursion Limit

TWA= Time Weighted Average (8 hr.)
STEL= Short Term Exposure Limit (15 min.)
WEEL= Workplace Environmental Exposure Level

SECTION 9 PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Appearance	liquid;
Colour	Clear, colorless
Form	liquid
Odour	ester-like
Odour Threshold	no data available
Flash point	-4 °C, 25 °F;
Flammability	Upper explosion limit: 11.5 %(V) Lower explosion limit: 2.1 %(V)
Boiling point/boiling range	77 °C, 170 °F;
Melting point/range	-84 °C, -119 °F;
Auto-ignition temperature	426 °C, 799 °F;
Decomposition temperature	no data available
Flammability (solid, gas)	no data available
Vapour pressure	97 hPa @ 20 °C, 68 °F;
Vapour density	1.2
Density	0.90 g/cm ³ @ 20 °C, 68 °F;
Specific gravity	no data available
Water solubility	completely miscible
Viscosity	no data available
Viscosity, dynamic	0.45 mPa.s @ 20 °C, 68 °F;
pH	not applicable

Ethyl Acetate

Evaporation rate no data available

Partition coefficient: n-octanol/water log Pow: 0.68; @ 25 °C, 77 °F;

SECTION 10 STABILITY AND REACTIVITY

Reactivity Stable under recommended storage conditions.

Chemical stability No decomposition if stored and applied as directed.

Conditions to avoid Heat, flames and sparks.

Hazardous decomposition products None known.

Materials to avoid Alkali metals
Strong oxidizing agents

Hazardous polymerisation None known.

SECTION 11 TOXICOLOGICAL INFORMATION

Acute dermal toxicity LD50 rabbit: > 2,000 mg/kg(literature value)

Acute inhalation toxicity no data available

Acute oral toxicity LD50 rat: > 2,000 mg/kg
(literature value)

Skin corrosion/irritation (rabbit)
Not irritating, (literature value)

Eye damage/irritation (rabbit)
slight irritation, (literature value)

Respiratory or skin sensitization guinea pig: not sensitizing; Maximisation Test
OECD Test Guideline 406

Germ cell mutagenicity **Genotoxicity in vitro:**
Type: Ames test
System: Salmonella typhimurium; with and without metabolic activation
Result: In vitro tests did not show mutagenic effects.
(literature value)

Genotoxicity in vivo:
no data available

Ethyl Acetate

Assessment Mutagenicity:

Based on available data, the classification criteria are not met.

Reproductive toxicity**Reproductive toxicity:**

no data available

Assessment Reproductive toxicity:

no data available

Teratogenicity:

no data available

Assessment teratogenicity:

no data available

STOT - single exposure

The substance or mixture is classified as specific target organ toxicant, single exposure, category 3 with narcotic effects.

STOT - repeated exposure

no data available

Aspiration toxicity

no data available

Carcinogenicity**Assessment carcinogenicity:**

Contains no ingredient listed as a carcinogen

SECTION 12**ECOLOGICAL INFORMATION**

Toxicity to fish

LC50 (Pimephales promelas (fathead minnow)) 96 hours: > 100 mg/l; semi-static test (literature value)

Toxicity to aquatic invertebrates

EC50 (Daphnia magna (Water flea)) 48 hours: > 100 mg/l; static test (literature value)

Toxicity to algae

EC50 (Desmodesmus subspicatus (green algae)) 72 hours: > 100 mg/l; static test (literature value)

Chronic toxicity to aquatic invertebrates

NOEC (Daphnia magna (Water flea)) 21 d: > 1 - 10 mg/l; semi-static test; OECD Test Guideline 211 (literature value)

Biodegradation

Readily biodegradable.

OECD Test Guideline 301B (28 d): > 60 % (literature value)

Bioaccumulation

No bioaccumulation is to be expected (log Pow ≤ 4).

Mobility in soil

no data available

Other adverse effects

This substance is not considered to be persistent, bioaccumulating nor toxic (PBT).;

Ethyl Acetate

SECTION 13 DISPOSAL CONSIDERATIONS

- Waste Code** U112 - Ethyl Acetate - (RQ 5,000 LB).D001 - Ignitability (RQ 100 LB). This product has the RCRA characteristic of ignitability. Re-evaluation of the product may be required by the user at the time of disposal, since the product uses, transformations, mixtures, contamination, and spillage may change the classification.
- Disposal methods** Dispose of only in accordance with local, state, and federal regulations. Do not contaminate any lakes, streams, ponds, groundwater or soil.
- Empty containers.** Empty containers retain product residue (liquid and/or vapor) and can be dangerous. DO NOT PRESSURIZE, CUT, WELD, BRAZE, SOLDER, DRILL, GRIND, OR EXPOSE SUCH CONTAINERS TO HEAT, FLAME, SPARKS, STATIC ELECTRICITY, OR OTHER SOURCES OF IGNITION; THEY MAY EXPLODE AND CAUSE INJURY OR DEATH. Empty drums should be completely drained, triple-rinsed, properly bunged and promptly returned to a drum reconditioner, or properly disposed.

SECTION 14 TRANSPORT INFORMATION

- DOT** UN 1173, Ethyl Acetate, 3, II
When shipped in quantities greater than 5,000 lbs, RQ must be added to the shipping description.
- IATA** UN 1173, Ethyl Acetate, 3, II
When shipped in quantities greater than 5,000 lbs, RQ must be added to the shipping description.
- IMDG** UN 1173, Ethyl Acetate, 3, II
When shipped in quantities greater than 5,000 lbs, RQ must be added to the shipping description.

Transport in bulk according to Annex II of MARPOL 73/78 and the IBC Code

Remarks no data available

SECTION 15 REGULATORY INFORMATION

U.S. FEDERAL REGULATIONS

OSHA Hazards (HCS 1994)

Flammable liquid

TSCA Inventory Listing

Components

Acetic acid ethyl ester

CAS-No.

141-78-6

SARA 302 Status

Components

CAS-No.

Weight percent

Ethyl Acetate

SARA 302: No chemicals in this material are subject to the reporting requirements of SARA Title III, Section 302.

SARA 311/312 Classification

"Fire hazard", "Immediate (acute) health hazard"

SARA 313 Chemical

Components

CAS-No.

Weight percent

SARA 313: This material does not contain any chemical components with known CAS numbers that exceed the threshold (De Minimis) reporting levels established by SARA Title III, Section 313.

US. EPA CERCLA Hazardous Substances (40 CFR 302)

Components

Reportable Quantity

Weight percent

Acetic acid ethyl ester

5,000 LB

100 %

INTERNATIONAL REGULATIONS

WHMIS Classification

Class B, Division 2: Flammable liquid.

Class D, Division 2, Subdivision B: Toxic material.

European Union

Classification according to Regulation (EU) 1272/2008.

Flammable liquids, Category 2

Eye irritation, Category 2

Specific target organ toxicity - single exposure, Category 3 (Narcotic effects)

Australia. Inventory of Chemical Substances (AICS)	Listed
Japan. Inventory of Existing and New Chemical Substances (ENCS)	Listed
Japan. Industrial Safety & Health Law (ISHL) Inventory	Listed
Canada. Domestic Substances List (DSL) Inventory	Listed
Canadian Non-Domestic Substance Listing (NDSL)	Not listed
European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances (EINECS) Listing	Listed
Philippines. Inventory of Chemicals / Chemical Substances (PICCS)	Listed
Korea. Existing Chemicals Inventory (KECI)	Listed
China. Inventory of Existing Chemical Substances (IECSC)	Listed
Mexico. National Inventory of Chemical Substances (INSQ)	Listed
New Zealand. Inventory of Chemicals (NZIoC)	Listed
Switzerland. Inventory of Notified New Substances (CHINV)	Listed
Taiwan. National Existing Chemical Inventory (NECI)	Listed

Ethyl Acetate

Please note: The names and CAS numbers which are used for this product in the stated inventories may deviate from the information which is listed in Section 3.

STATE REGULATIONS

California Prop. 65

Components

none

CAS-No.

SECTION 16 OTHER INFORMATION

HAZARD RATINGS

	<u>Health</u>	<u>Flammability</u>	<u>Physical Hazard/ Instability</u>
HMIS®	2	3	0
NFPA	2	3	0

THE DATA AND INFORMATION CONTAINED HEREIN ARE BEING FURNISHED FOR INFORMATIONAL PURPOSES ONLY, UPON THE EXPRESS CONDITION THAT EACH CUSTOMER SHALL MAKE ITS OWN ASSESSMENT OF APPROPRIATE USE AND APPROPRIATE SHIPPING, TRANSFER AND STORAGE MATERIALS AND PROCEDURES FOR SASOL CHEMICALS (USA) LLC'S PRODUCTS. ALTHOUGH BASED ON INFORMATION SOURCES WHICH SASOL CHEMICALS (USA) LLC CONSIDERS ACCURATE AND RELIABLE, SASOL CHEMICALS (USA) LLC MAKES NO WARRANTY, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, REGARDING THE VALIDITY OF THIS INFORMATION, THE INFORMATION SOURCES UPON WHICH THE SAME ARE BASED, OR THE RESULTS TO BE OBTAINED, AND EXPRESSLY DISCLAIMS LIABILITIES FOR DAMAGES OR INJURIES RESULTING FROM THE USE THEREOF.

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980

Revision date: 10/17/2016

Supersedes: 06/03/2015

SECTION: 1. Product and company identification

1.1. Product identifier

Product form : Substance
Name : Hydrogen, compressed
CAS No : 1333-74-0
Formula : H₂
Other means of identification : Dihydrogen, parahydrogen, refrigerant gas R702, water gas

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Use of the substance/mixture : Industrial use. Use as directed.

1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

Praxair, Inc.
10 Riverview Drive
Danbury, CT 06810-6268 - USA
T 1-800-772-9247 (1-800-PRAXAIR) - F 1-716-879-2146
www.praxair.com

1.4. Emergency telephone number

Emergency number : Onsite Emergency: 1-800-645-4633

CHEMTREC, 24hr/day 7days/week
— Within USA: 1-800-424-9300, Outside USA: 001-703-527-3887
(collect calls accepted, Contract 17729)

SECTION 2: Hazard identification

2.1. Classification of the substance or mixture

GHS-US classification

Flam. Gas 1 H220
Compressed gas H280

2.2. Label elements

GHS-US labeling

Hazard pictograms (GHS-US) :



GHS02

GHS04

Signal word (GHS-US) :

DANGER

Hazard statements (GHS-US) :

H220 - **EXTREMELY FLAMMABLE GAS**
H280 - CONTAINS GAS UNDER PRESSURE; MAY EXPLODE IF HEATED
OSHA-H01 - MAY DISPLACE OXYGEN AND CAUSE RAPID SUFFOCATION
CGA-HG04 - MAY FORM EXPLOSIVE MIXTURES WITH AIR
CGA-HG08 - BURNS WITH INVISIBLE FLAME

Precautionary statements (GHS-US) :

P202 - Do not handle until all safety precautions have been read and understood
P210 - Keep away from Heat, Open flames, Sparks, Hot surfaces. - No smoking
P271+P403 - Use and store only outdoors or in a well-ventilated place
P377 - Leaking gas fire: Do not extinguish, unless leak can be stopped safely
P381 - Eliminate all ignition sources if safe to do so
CGA-PG05 - Use a back flow preventive device in the piping
CGA-PG10 - Use only with equipment rated for cylinder pressure
CGA-PG12 - Do not open valve until connected to equipment prepared for use
CGA-PG06 - Close valve after each use and when empty
CGA-PG02 - Protect from sunlight when ambient temperature exceeds 52°C (125°F)

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980 Revision date: 10/17/2016 Supersedes: 06/03/2015

2.3. Other hazards

Other hazards not contributing to the classification : None.

2.4. Unknown acute toxicity (GHS US)

No data available

SECTION 3: Composition/Information on ingredients

3.1. Substance

Name : Hydrogen, compressed
CAS No : 1333-74-0

Name	Product identifier	%
Hydrogen	(CAS No) 1333-74-0	99.5 - 100

3.2. Mixture

Not applicable

SECTION 4: First aid measures

4.1. Description of first aid measures

First-aid measures after inhalation : Remove to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing. If not breathing, give artificial respiration. If breathing is difficult, trained personnel should give oxygen. Call a physician.

First-aid measures after skin contact : Adverse effects not expected from this product.

First-aid measures after eye contact : Immediately flush eyes thoroughly with water for at least 15 minutes. Hold the eyelids open and away from the eyeballs to ensure that all surfaces are flushed thoroughly. Contact an ophthalmologist immediately.. Get immediate medical attention.

First-aid measures after ingestion : Ingestion is not considered a potential route of exposure.

4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed

No additional information available

4.3. Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

None.

SECTION 5: Firefighting measures

5.1. Extinguishing media

Suitable extinguishing media : Carbon dioxide, dry chemical powder, water spray, fog.

5.2. Special hazards arising from the substance or mixture

Fire hazard : **EXTREMELY FLAMMABLE GAS.** The hydrogen flame is nearly invisible. Hydrogen has a low ignition energy; escaping hydrogen gas may ignite spontaneously. A fireball forms if the gas cloud ignites immediately after release. Hydrogen forms explosive mixtures with air and oxidizing agents.

Explosion hazard : **EXTREMELY FLAMMABLE GAS.** Forms explosive mixtures with air and oxidizing agents.

Reactivity : No reactivity hazard other than the effects described below.

5.3. Advice for firefighters

Firefighting instructions : If venting or leaking gas catches fire, do not extinguish flames. Flammable vapors may spread from leak, creating an explosive reignition hazard. Vapors can be ignited by pilot lights, other flames, smoking, sparks, heaters, electrical equipment, static discharge, or other ignition sources at locations distant from product handling point. Explosive atmospheres may linger. Before entering an area, especially a confined area, check the atmosphere with an appropriate device

Evacuate all personnel from the danger area. Use self-contained breathing apparatus (SCBA) and protective clothing. Immediately cool containers with water from maximum distance. Stop flow of gas if safe to do so, while continuing cooling water spray. Remove ignition sources if safe to do so. Remove containers from area of fire if safe to do so. On-site fire brigades must comply with OSHA 29 CFR 1910.156 and applicable standards under 29 CFR 1910 Subpart L—Fire Protection.

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980

Revision date: 10/17/2016

Supersedes: 06/03/2015

Protection during firefighting	: Compressed gas: asphyxiant. Suffocation hazard by lack of oxygen.
Special protective equipment for fire fighters	: Standard protective clothing and equipment (Self Contained Breathing Apparatus) for fire fighters.
Specific methods	: Use fire control measures appropriate for the surrounding fire. Exposure to fire and heat radiation may cause gas containers to rupture. Cool endangered containers with water spray jet from a protected position. Prevent water used in emergency cases from entering sewers and drainage systems
	Stop flow of product if safe to do so
	Use water spray or fog to knock down fire fumes if possible.

SECTION 6: Accidental release measures

6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

General measures	: DANGER: EXTREMELY FLAMMABLE GAS. Forms explosive mixtures with air and oxidizing agents. See section 5. Evacuate personnel to a safe area. Appropriate self-contained breathing apparatus may be required. Approach suspected leak area with caution. Remove all sources of ignition. if safe to do so. Reduce gas with fog or fine water spray. Stop flow of product if safe to do so. Ventilate area or move container to a well-ventilated area. Flammable gas may spread from leak. Before entering the area, especially a confined area, check the atmosphere with an appropriate device.
------------------	---

6.1.1. For non-emergency personnel

No additional information available

6.1.2. For emergency responders

No additional information available

6.2. Environmental precautions

Prevent waste from contaminating the surrounding environment. Prevent soil and water pollution. Dispose of contents/container in accordance with local/regional/national/international regulations. Contact supplier for any special requirements.

6.3. Methods and material for containment and cleaning up

No additional information available

6.4. Reference to other sections

See also sections 8 and 13.

SECTION 7: Handling and storage

7.1. Precautions for safe handling

Precautions for safe handling	: Keep away from heat, hot surfaces, sparks, open flames and other ignition sources. No smoking. Use only non-sparking tools. Use only explosion-proof equipment
	Wear leather safety gloves and safety shoes when handling cylinders. Protect cylinders from physical damage; do not drag, roll, slide or drop. While moving cylinder, always keep in place removable valve cover. Never attempt to lift a cylinder by its cap; the cap is intended solely to protect the valve. When moving cylinders, even for short distances, use a cart (trolley, hand truck, etc.) designed to transport cylinders. Never insert an object (e.g. wrench, screwdriver, pry bar) into cap openings; doing so may damage the valve and cause a leak. Use an adjustable strap wrench to remove over-tight or rusted caps. Slowly open the valve. If the valve is hard to open, discontinue use and contact your supplier. Close the container valve after each use; keep closed even when empty. Never apply flame or localized heat directly to any part of the container. High temperatures may damage the container and could cause the pressure relief device to fail prematurely, venting the container contents. For other precautions in using this product, see section 16.

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980 Revision date: 10/17/2016 Supersedes: 06/03/2015

7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Storage conditions : Store only where temperature will not exceed 125°F (52°C). Post "No Smoking/No Open Flames" signs in storage and use areas. There must be no sources of ignition. Separate packages and protect against potential fire and/or explosion damage following appropriate codes and requirements (e.g. NFPA 30, NFPA 55, NFPA 70, and/or NFPA 221 in the U.S.) or according to requirements determined by the Authority Having Jurisdiction (AHJ). Always secure containers upright to keep them from falling or being knocked over. Install valve protection cap, if provided, firmly in place by hand when the container is not in use. Store full and empty containers separately. Use a first-in, first-out inventory system to prevent storing full containers for long periods. For other precautions in using this product, see section 16

OTHER PRECAUTIONS FOR HANDLING, STORAGE, AND USE: When handling product under pressure, use piping and equipment adequately designed to withstand the pressures to be encountered. Never work on a pressurized system. Use a back flow preventive device in the piping. Gases can cause rapid suffocation because of oxygen deficiency; store and use with adequate ventilation. If a leak occurs, close the container valve and blow down the system in a safe and environmentally correct manner in compliance with all international, federal/national, state/provincial, and local laws; then repair the leak. Never place a container where it may become part of an electrical circuit.

7.3. Specific end use(s)

None.

SECTION 8: Exposure controls/personal protection

8.1. Control parameters

Hydrogen, compressed (1333-74-0)		
ACGIH	Not established	
USA OSHA	Not established	
Hydrogen (1333-74-0)		
ACGIH	Remark (ACGIH)	Simple asphyxiant
USA OSHA	Not established	

8.2. Exposure controls

Appropriate engineering controls : Use an explosion-proof local exhaust system. Local exhaust and general ventilation must be adequate to meet exposure standards. **MECHANICAL (GENERAL): Inadequate - Use only in a closed system.** Use explosion proof equipment and lighting.

Eye protection : Wear safety glasses with side shields.

Respiratory protection : An air-supplied respirator must be used while working with this product in confined spaces. The respiratory protection used must conform with OSHA rules as specified in 29 CFR 1910.134. Select per OSHA 29 CFR 1910.134 and ANSI Z88.2.

Thermal hazard protection : None necessary.

Other information : Consider the use of flame resistant anti-static safety clothing. Wear safety shoes while handling containers.

SECTION 9: Physical and chemical properties

9.1. Information on basic physical and chemical properties

Physical state : Gas

Appearance : Colorless gas.

Molecular mass : 2 g/mol

Color : Colorless.

Odor : Odorless.

Odor threshold : No data available

pH : Not applicable.

Relative evaporation rate (butyl acetate=1) : No data available

Relative evaporation rate (ether=1) : Not applicable.

Melting point : -259.2 °C (-434.56°F)

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980 Revision date: 10/17/2016 Supersedes: 06/03/2015

Freezing point	: No data available
Boiling point	: -252.9 °C (-422.97°F)
Flash point	: No data available
Critical temperature	: -239.9 °C (-399.82°F)
Auto-ignition temperature	: 566 °C (1051°F)
Decomposition temperature	: No data available
Flammability (solid, gas)	: No data available
Vapor pressure	: Not applicable.
Relative vapor density at 20 °C	: No data available
Relative density	: No data available
Density	: 0.089 g/l (0.0056 lb/ft ³) (at STP = 0°C and 1atm)
Relative gas density	: 0.07
Solubility	: Water: 1.6 mg/l
Log Pow	: Not applicable.
Log Kow	: Not applicable.
Viscosity, kinematic	: Not applicable.
Viscosity, dynamic	: Not applicable.
Explosive properties	: Not applicable.
Oxidizing properties	: None.
Explosion limits	: 4 - 77 vol %

9.2. Other information

Gas group	: Compressed gas
Additional information	: BURNS WITH INVISIBLE FLAME

SECTION 10: Stability and reactivity

10.1. Reactivity

No reactivity hazard other than the effects described below.

10.2. Chemical stability

Stable under normal conditions.

10.3. Possibility of hazardous reactions

Can form explosive mixture with air. May react violently with oxidants.

10.4. Conditions to avoid

Keep away from heat/sparks/open flames/hot surfaces. – No smoking.

10.5. Incompatible materials

Oxidizing agents. Lithium. Halogens.

10.6. Hazardous decomposition products

Under normal conditions of storage and use, hazardous decomposition products should not be produced.

SECTION 11: Toxicological information

11.1. Information on toxicological effects

Acute toxicity	: Not classified
----------------	------------------

Hydrogen, compressed (1333-74-0

LC50 inhalation rat (ppm)	> 15000 ppm/1h
---------------------------	----------------

Hydrogen (1333-74-0)

LC50 inhalation rat (ppm)	> 15000 ppm/1h
---------------------------	----------------

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980 Revision date: 10/17/2016 Supersedes: 06/03/2015

Skin corrosion/irritation	: Not classified
	pH: Not applicable.
Serious eye damage/irritation	: Not classified
	pH: Not applicable.
Respiratory or skin sensitization	: Not classified
Germ cell mutagenicity	: Not classified
Carcinogenicity	: Not classified
Reproductive toxicity	: Not classified
Specific target organ toxicity (single exposure)	: Not classified
Specific target organ toxicity (repeated exposure)	: Not classified
Aspiration hazard	: Not classified

SECTION 12: Ecological information

12.1. Toxicity

Ecology - general	: No ecological damage caused by this product.
-------------------	--

12.2. Persistence and degradability

Hydrogen, compressed (1333-74-0)	
Persistence and degradability	No ecological damage caused by this product.
Hydrogen (1333-74-0)	
Persistence and degradability	No ecological damage caused by this product.

12.3. Bioaccumulative potential

Hydrogen, compressed (1333-74-0)	
BCF fish 1	(no bioaccumulation expected)
Log Pow	Not applicable.
Log Kow	Not applicable.
Bioaccumulative potential	No ecological damage caused by this product.
Hydrogen (1333-74-0)	
BCF fish 1	(no bioaccumulation expected)
Log Pow	Not applicable.
Log Kow	Not applicable.
Bioaccumulative potential	No ecological damage caused by this product.

12.4. Mobility in soil

Hydrogen, compressed (1333-74-0)	
Mobility in soil	No data available.
Ecology - soil	No ecological damage caused by this product.
Hydrogen (1333-74-0)	
Mobility in soil	No data available.
Ecology - soil	No ecological damage caused by this product.

12.5. Other adverse effects

Effect on ozone layer	: None
Effect on the global warming	: No known effects from this product

SECTION 13: Disposal considerations

13.1. Waste treatment methods

Waste disposal recommendations	: Dispose of contents/container in accordance with local/regional/national/international regulations. Contact supplier for any special requirements.
--------------------------------	--

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980

Revision date: 10/17/2016

Supersedes: 06/03/2015

SECTION 14: Transport information

In accordance with DOT

Transport document description : UN1049 Hydrogen, compressed, 2.1
UN-No.(DOT) : UN1049
Proper Shipping Name (DOT) : Hydrogen, compressed
Class (DOT) : 2.1 - Class 2.1 - Flammable gas 49 CFR 173.115
Hazard labels (DOT) : 2.1 - Flammable gas



DOT Special Provisions (49 CFR 172.102) : N89 - When steel UN pressure receptacles are used, only those bearing the "H" mark are authorized

Additional information

Emergency Response Guide (ERG) Number : 115 (UN1049)
Other information : No supplementary information available.
Special transport precautions : Avoid transport on vehicles where the load space is not separated from the driver's compartment. Ensure vehicle driver is aware of the potential hazards of the load and knows what to do in the event of an accident or an emergency. Before transporting product containers:
- Ensure there is adequate ventilation. - Ensure that containers are firmly secured. - Ensure cylinder valve is closed and not leaking. - Ensure valve outlet cap nut or plug (where provided) is correctly fitted. - Ensure valve protection device (where provided) is correctly fitted.

Transport by sea

UN-No. (IMDG) : 1049
Proper Shipping Name (IMDG) : HYDROGEN, COMPRESSED
Class (IMDG) : 2 - Gases
MFAG-No : 115

Air transport

UN-No. (IATA) : 1049
Proper Shipping Name (IATA) : Hydrogen, compressed
Class (IATA) : 2
Civil Aeronautics Law : Gases under pressure/Gases flammable under pressure

SECTION 15: Regulatory information

15.1. US Federal regulations

Hydrogen, compressed (1333-74-0)

Listed on the United States TSCA (Toxic Substances Control Act) inventory

SARA Section 311/312 Hazard Classes	Sudden release of pressure hazard Fire hazard
-------------------------------------	--

All components of this product are listed on the Toxic Substances Control Act (TSCA) inventory.

This product or mixture does not contain a toxic chemical or chemicals in excess of the applicable de minimis concentration as specified in 40 CFR §372.38(a) subject to the reporting requirements of section 313 of Title III of the Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 and 40 CFR Part 372.

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980 Revision date: 10/17/2016 Supersedes: 06/03/2015

15.2. International regulations

CANADA

Hydrogen, compressed (1333-74-0)
Listed on the Canadian DSL (Domestic Substances List)
Hydrogen (1333-74-0)
Listed on the Canadian DSL (Domestic Substances List)

EU-Regulations

Hydrogen, compressed (1333-74-0)
Listed on the EEC inventory EINECS (European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances)

15.2.2. National regulations

Hydrogen, compressed (1333-74-0)
Listed on the AICS (Australian Inventory of Chemical Substances) Listed on IECSC (Inventory of Existing Chemical Substances Produced or Imported in China) Listed on the Korean ECL (Existing Chemicals List) Listed on NZIoC (New Zealand Inventory of Chemicals) Listed on PICCS (Philippines Inventory of Chemicals and Chemical Substances) Listed on INSQ (Mexican National Inventory of Chemical Substances)

15.3. US State regulations

Hydrogen, compressed(1333-74-0)	
U.S. - California - Proposition 65 - Carcinogens List	No
U.S. - California - Proposition 65 - Developmental Toxicity	No
U.S. - California - Proposition 65 - Reproductive Toxicity - Female	No
U.S. - California - Proposition 65 - Reproductive Toxicity - Male	No
State or local regulations	U.S. - Massachusetts - Right To Know List U.S. - New Jersey - Right to Know Hazardous Substance List U.S. - Pennsylvania - RTK (Right to Know) List

California Proposition 65 - This product does not contain any substances known to the state of California to cause cancer, developmental and/or reproductive harm

Hydrogen (1333-74-0)				
U.S. - California - Proposition 65 - Carcinogens List	U.S. - California - Proposition 65 - Developmental Toxicity	U.S. - California - Proposition 65 - Reproductive Toxicity - Female	U.S. - California - Proposition 65 - Reproductive Toxicity - Male	Non-significant risk level (NSRL)
No	No	No	No	

Hydrogen (1333-74-0)				
U.S. - Massachusetts - Right To Know List U.S. - New Jersey - Right to Know Hazardous Substance List U.S. - Pennsylvania - RTK (Right to Know) List				

Hydrogen, compressed

Safety Data Sheet P-4604

This SDS conforms to U.S. Code of Federal Regulations 29 CFR 1910.1200, Hazard Communication.

Date of issue: 01/01/1980 Revision date: 10/17/2016 Supersedes: 06/03/2015

SECTION 16: Other information

Other information

: When you mix two or more chemicals, you can create additional, unexpected hazards. Obtain and evaluate the safety information for each component before you produce the mixture. Consult an industrial hygienist or other trained person when you evaluate the end product. Before using any plastics, confirm their compatibility with this product

Praxair asks users of this product to study this SDS and become aware of the product hazards and safety information. To promote safe use of this product, a user should (1) notify employees, agents, and contractors of the information in this SDS and of any other known product hazards and safety information, (2) furnish this information to each purchaser of the product, and (3) ask each purchaser to notify its employees and customers of the product hazards and safety information

The opinions expressed herein are those of qualified experts within Praxair, Inc. We believe that the information contained herein is current as of the date of this Safety Data Sheet. Since the use of this information and the conditions of use are not within the control of Praxair, Inc, it is the user's obligation to determine the conditions of safe use of the product

Praxair SDSs are furnished on sale or delivery by Praxair or the independent distributors and suppliers who package and sell our products. To obtain current SDSs for these products, contact your Praxair sales representative, local distributor, or supplier, or download from www.praxair.com. If you have questions regarding Praxair SDSs, would like the document number and date of the latest SDS, or would like the names of the Praxair suppliers in your area, phone or write the Praxair Call Center (Phone: 1-800-PRAXAIR/1-800-772-9247; Address: Praxair Call Center, Praxair, Inc, P.O. Box 44, Tonawanda, NY 14151-0044)

PRAXAIR and the Flowing Airstream design are trademarks or registered trademarks of Praxair Technology, Inc. in the United States and/or other countries.

NFPA health hazard

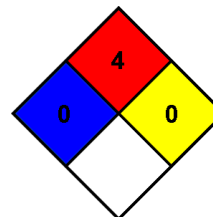
: 0 - Exposure under fire conditions would offer no hazard beyond that of ordinary combustible materials.

NFPA fire hazard

: 4 - Will rapidly or completely vaporize at normal pressure and temperature, or is readily dispersed in air and will burn readily.

NFPA reactivity

: 0 - Normally stable, even under fire exposure conditions, and are not reactive with water.



HMIS III Rating

Health

: 0 Minimal Hazard - No significant risk to health

Flammability

: 4 Severe Hazard

Physical

: 3 Serious Hazard

SDS US (GHS HazCom 2012) - Praxair

This information is based on our current knowledge and is intended to describe the product for the purposes of health, safety and environmental requirements only. It should not therefore be construed as guaranteeing any specific property of the product.

SECTION 1: CHEMICAL PRODUCT and COMPANY IDENTIFICATION

Product Name: Aldol Tech. Grade

Product Code: A12910

Supplier: Pfaltz & Bauer, Inc.
172 E. Aurora Street
Waterbury, CT 06708

Phone: 203-574-0075

FAX: 203-574-3181

Emergency Phone: CHEMTREC, US: 1-800-424-9300
CHEMTREC, International: 1-703-527-3887

SECTION 2: HAZARDS IDENTIFICATION

Statement of Hazard: Irritant, Respiratory irritant, Toxic

Acute Health Hazard: Irritant to eyes, skin, mucous membranes and respiratory system.
May be harmful by ingestion and inhalation, fatal by skin absorption.

Chronic Health Hazard: Not Available

HMIS Rating: H: 3 F: 0 P: 0

NFPA Rating: H: 3 F: 0 R: 0

To the best of our knowledge, the toxicological properties of this chemical have not been thoroughly investigated. Use appropriate procedures and precautions to prevent or minimize exposure.

GHS Classification in accordance with 29 CFR 1910 (OSHA HCS):

Acute toxicity, dermal (Category 1), H310
Acute toxicity, inhalation (Category 4), H332
Acute toxicity, oral (Category 4), H302
Serious eye damage/eye irritation (Category 2A), H319
Skin corrosion/irritation (Category 2), H315
Specific target organ toxicity, single exposure; Respiratory tract irritation (Category 3), H335

Pictogram:



Signal Word:

Danger

Hazard Statement(s):

H302 Harmful if swallowed.
H310 Fatal in contact with skin.
H315 Causes skin irritation.
H319 Causes serious eye irritation.
H332 Harmful if inhaled.
H335 May cause respiratory irritation.

Precautionary Statement(s):

P210 Keep away from heat/sparks/open flames/hot surfaces. — No smoking.
P261 Avoid breathing dust/fume/gas/mist/vapors/spray.
P262 Do not get in eyes, on skin, or on clothing.
P264 Wash skin thoroughly after handling.
P270 Do not eat, drink, or smoke when using this product.
P280 Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.
P301+P312 IF SWALLOWED: call a POISON CENTER or doctor/physician IF you feel unwell.
P302+P350 IF ON SKIN: Gently wash with plenty of soap and water.
P304+P340 IF INHALED: Remove victim to fresh air and Keep at rest in a position comfortable for breathing.
P305+P351+P338 IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
P332+P313 IF SKIN irritation occurs: Get medical advice/attention.
P403+P235 Store in a well-ventilated place. Keep cool.

SECTION 3: COMPOSITION/INFORMATION on INGREDIENTS

Chemical Name:

Aldol Tech. Grade

Synonyms:

3-Hydroxybutanal

CAS Number:

107-89-1

MDL Number:

MFCD00024164

EINECS Number:

203-530-2

Beilstein Registry Number:

Not Available

Molecular Formula:

C₄H₈O₂

Molecular Weight:

88.11

Content:

As specified in product name.

SECTION 4: FIRST AID MEASURES

<u>Eye Contact:</u>	Flush eyes with large amounts of water for fifteen minutes. Separate eyelids with fingers. If irritation persists, seek medical attention.
<u>Skin Contact:</u>	Wash skin with soap and water. If irritation persists, seek medical attention.
<u>Ingestion:</u>	Do not induce vomiting. Seek medical attention.
<u>Inhalation:</u>	Move to a fresh air environment. Contact a physician if breathing becomes difficult.

SECTION 5: FIRE FIGHTING MEASURES

<u>Flash Point (°C):</u>	44
<u>Explosion Limits:</u>	Not Available
<u>Auto Ignition Temperature (°C):</u>	Not Available
<u>Extinguishing Media:</u>	Carbon dioxide, dry chemical powder, alcohol-resistant foam, or water spray
<u>Protective Equipment:</u>	Wear self-contained respirator and fully protective impervious suit.
<u>Specific Hazards:</u>	May emit hazardous fumes under fire conditions.

SECTION 6: ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

<u>Personal Protection:</u>	Wear a self-contained breathing apparatus, rubber boots and gloves, and disposable coveralls. Dispose of coveralls after use. Remove from ignition sources if safe to do so. Follow emergency response plan and contact proper authorities if needed. Keep unprotected persons away.
<u>Environmental Protection:</u>	Keep spills out of sewers and bodies of water. Dike and contain the spill with inert material. Absorb on sand, vermiculite or diatomite. Transfer material to a container for disposal or recovery. Ventilate area and wash spill site after material pickup is complete.

SECTION 7: HANDLING and STORAGE

<u>Handling and Storage:</u>	Avoid breathing dust, vapor, mist or gas. Avoid contact with skin and eyes. Avoid prolonged or repeated exposure. Use only in a chemical fume hood. Open and handle container with care. Keep ignition sources away. Store in a tightly closed container in a dry, well-ventilated place.
------------------------------	--

Sensitivities: Not Available

Storage Temperature (°C): 15 to 30

SECTION 8: EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

Engineering Controls: Use product in a well ventilated area or under a fume hood. Use proper lab equipment while handling this product. Keep away from incompatible materials for possible risk of hazardous reaction.

Eye Protection: Wear appropriate protective eyeglass or chemical safety goggles. Make sure that there is an eyewash station in your vicinity.

Skin Protection: Wear impervious gloves and protective clothing.

Respiratory Protection: Use a NIOSH approved respirator when exposure limits are exceeded or if irritation or other symptoms are experienced.

<u>Exposure Limits:</u>	<u>Country</u>	<u>Source</u>	<u>Type</u>	<u>Value</u>
	USA	ACGIH	TWA	Not Available
	USA	OSHA	STEL	Not Available
	USA	OSHA	PEL	Not Available

SECTION 9: PHYSICAL and CHEMICAL PROPERTIES

Appearance: Clear to light yellow viscous liquid

Odor: Not Available

Odor Threshold: Not Available

Flash Point (°C): 44

Auto Ignition Temperature (°C): Not Available

UEL % by Volume: Not Available

LEL % by Volume: Not Available

Melting Point (°C): -88

Boiling Point (°C): 162.-163

<u>Evaporation Rate:</u>	Not Available
<u>pH Value:</u>	Not Available
<u>Density (g/cm³):</u>	0.981
<u>Refractive Index (n_D²⁰):</u>	1.4238
<u>Viscosity:</u>	Not Available
<u>Solubility in Water:</u>	Not Available
<u>Solubility in Other:</u>	Not Available
<u>Vapor Pressure (mmHg):</u>	Not Available
<u>Vapor Density (Air=1):</u>	Not Available

SECTION 10: STABILITY and REACTIVITY

<u>Stability:</u>	Stable under normal temperatures and pressures.
<u>Incompatibility:</u>	Strong oxidizing agents
<u>Reactivity:</u>	Product may react with incompatible materials to release other hazardous substances.
<u>Conditions to Avoid:</u>	Heat, flame, sparks, other ignition sources.
<u>Hazardous Decomposition Products:</u>	Carbon oxides

SECTION 11: TOXICOLOGICAL INFORMATION

<u>RTECS Reference:</u>	ES315000
<u>Target Organs:</u>	Not Available
<u>Toxicity Data:</u>	Oral Rat LD ₅₀ mg/kg: 2,180.00
	Dermal Rabbit LD ₅₀ mg/kg: 140.00
<u>Carcinogenicity:</u>	National Toxicology Program (NTP) listed: Not Available
	International Agency for Research on Cancer (IARC) listed: Not Available
<u>Potential Symptoms:</u>	Not Available

SECTION 12: ECOLOGICAL INFORMATION

Toxicity:

Not Available

SECTION 13: DISPOSAL CONSIDERATIONS

Contact a licensed professional waste disposal service. Dispose in a manner consistent with federal, state and local environmental regulations.

SECTION 14: TRANSPORT INFORMATION

<u>DOT Shipping Name:</u>	Aldol
<u>DOT UN Number:</u>	UN2839
<u>DOT Hazard Class:</u>	Class 6.1
<u>DOT Packing Group:</u>	PGII
<u>IMDG Shipping Name:</u>	Aldol
<u>IMDG UN Number:</u>	UN2839
<u>IMDG Hazard Class:</u>	Class 6.1
<u>IMDG Packing Group:</u>	PGII
<u>Marine Pollutant:</u>	No
<u>IATA Shipping Name:</u>	Aldol
<u>IATA UN Number:</u>	UN2839
<u>IATA Hazard Class:</u>	Class 6.1
<u>IATA Packing Group:</u>	PGII

SECTION 15: REGULATORY INFORMATION

United States

Toxic Substance Control Act (TSCA) listed: Yes

Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA 302) listed: No

Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA 311/312) listed: No

Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA 313) listed: No

European Union

European Inventory of Existing Chemical Substances (EINECS): 203-530-2

Canada

Canadian Domestic Substances List (DSL) listed: Yes

Canadian Non-Domestic Substances List (NDSL) listed: No

SECTION 16: OTHER INFORMATION

Date Prepared: 3/9/2017

The information above is presented in good faith. It is believed to be accurate and represents the best information currently available to us. However, we make no warranty with respect to such information and we assume no liability resulting from its use. The user should consider this information as a supplement to other information that may be available and make independent judgement to ensure proper use to protect the health and safety of employees and the environment. Pfaltz and Bauer shall not be held liable for any damage resulting from handling or from contact with the above product.

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

1 IDENTIFICATION OF THE SUBSTANCE/PREPARATION AND THE COMPANY/UNDERTAKING

Product name	1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate
Product code	IL-0004
CAS	145022-45-3
REACH No.	A registration number is not available for this substance as the substance or its uses are exempted from registration, the annual tonnage does not require a registration or the registration is envisaged for a later registration deadline.
Identified uses	Laboratory chemicals, Manufacture of substances
Supplier	IoLiTec Ionic Liquids Technologies GmbH Salzstrasse 184 D – 74076 Heilbronn Germany
Telephone	+49 (0)7131-89839-0
Fax	+49 (0)7131-89839-109
Emergency telephone	+49 (0)176-84850874
Email	msds@iolitec.de

2 HAZARDS IDENTIFICATION

2.1 Classification of the substance or mixture

Classification (REGULATION (EC) No 1272/2008)

Skin sensitization (Category 1)

Chronic aquatic toxicity (Category 3)

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

Classification (67/548/EEC or 1999/45/EC)

May cause sensitization by skin contact. Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

2.2 Label elements

Labelling (REGULATION (EC) No 1272/2008)

Pictogram



Signal word

Warning

Hazard statement(s)

H317

May cause an allergic skin reaction.

H412

Harmful to aquatic life with long lasting effects.

Precautionary statement(s)

P273

Avoid release to the environment.

P280

Wear protective gloves.

Supplemental Hazard Statements none

Labelling (67/548/EEC or 1999/45/EC)

Hazard symbol(s)



R-phrases(s)

R43

May cause sensitization by skin contact.

R52/53

Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

S-phrases(s)

S36/37

Wear suitable protective clothing and gloves.

S61

Avoid release to the environment. Refer to special instructions/ Safety data sheets.

Other hazards - none

3 COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

Ingredient name	Contents	Health(Class)	Risk(R/No.)
1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate	>99%		Substance not yet fully tested!

4 FIRST AID MEASURES

General	Contaminated clothing should be removed and washed before being reused.
Inhalation	Move the exposed person to fresh air at once. If respiratory problems, provide artificial respiration/oxygen.
Ingestion	Immediately rinse mouth and provide fresh air. Do not induce vomiting. Get medical attention immediately.
Skin	Wash the skin immediately with soap and water.
Eyes	Promptly wash eyes with plenty of water while lifting the eye lids. Continue to rinse for at least 15 minutes. Get medical attention immediately. Continue to rinse.

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

5 FIRE FIGHTING MEASURES

Extinguishing media

Use: Water spray, fog or mist. Carbon dioxides (CO₂). Dry chemicals, sand, dolomite etc.

Special fire fighting procedures

Avoid water in straight hose stream, will scatter and spread fire. Keep run-off water out of sewers and water sources. Dike for water control.

Unusual fire & explosion hazards

Fire causes formation of toxic gases.

Protective measures in fire

Wear self-contained breathing apparatus as combustion may produce hazardous fumes.

6 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Personal precautions during spill

Wear protective clothing and avoid inhalation of vapor, skin or eye contact.

Precautions to protect environment

Avoid washing into water courses. Avoid contaminating public drains or water supply.

Spill cleanup methods

Avoid contact with skin or inhalation of spillage, dust or vapor, Avoid dust formation. Collect and reclaim or dispose in sealed containers in license waste. Extinguish all ignition sources. Avoid sparks, flames, heat and smoking. Ventilate.

7 HANDLING AND STORAGE

Usage precautions

Keep away from heat, sparks and open flame. Do not use in confined spaces without adequate ventilation and/or respirator.

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

Storage precautions

Store at moderate temperatures in dry, well ventilated area.

Storage criteria

Chemical storage.

8 EXPOSURE CONTROLS AND PERSONAL PROTECTION

Personal protective equipment**Eye/face protection**

Safety glasses with side-shields conforming to EN166 Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU).

Skin protection

Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.

The selected protective gloves have to satisfy the specifications of EU Directive 89/686/EEC and the standard EN 374 derived from it.

Body Protection

Impervious clothing. The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.

Respiratory protection

For nuisance exposures use type P95 (US) or type P1 (EU EN 143) particle respirator. For higher level protection use type OV/AG/P99 (US) or type ABEK-P2 (EU EN 143) respirator cartridges. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).

9 PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Appearance

Liquid.

Color

Colorless to yellow.

Odor/taste

No characteristic odor.

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

10 STABILITY AND REACTIVITY

Stability	No particular stability concerns.
Conditions to avoid	Avoid contact to strong oxidizers and bases.
Hazardous	
Decomposition Products	High temperatures generate: Corrosive gases/vapor/fumes of: Carbon dioxide (CO ₂). Carbon monoxide (CO). Nitrous gases (NO _x).

11 TOXICOLOGICAL INFORMATION

Acute toxicity

LD50 Oral - rat - > 2.000 mg/kg

Remarks: No mortality observed at this dose.

LD50 Dermal - rat - > 2.000 mg/kg

Skin corrosion/irritation

no data available

Serious eye damage/eye irritation

no data available

Respiratory or skin sensitization

Germ cell mutagenicity

no data available

Carcinogenicity

IARC: No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as probable, possible or confirmed human carcinogen by IARC.

Reproductive toxicity

no data available

Specific target organ toxicity - single exposure

no data available

Specific target organ toxicity - repeated exposure

no data available

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

Aspiration hazard

no data available

Potential health effects

Inhalation May be harmful if inhaled. May cause respiratory tract irritation.

Ingestion May be harmful if swallowed.

Skin May be harmful if absorbed through skin. May cause skin irritation.

Eyes May cause eye irritation.

Signs and Symptoms of Exposure

To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.

Additional Information

RTECS: Not available

12 ECOLOGICAL INFORMATION

Toxicity

Toxicity to daphnia and other aquatic invertebrates

Immobilization EC50 - Daphnia magna (Water flea) - 65,7 mg/l - 48 h

Method: OECD Test Guideline 202

Toxicity to algae

Growth inhibition NOEC - Desmodesmus subspicatus (green algae) - 13,7 mg/l - 72 h

Method: OECD Test Guideline 201

Persistence and degradability

no data available

Bioaccumulative potential

no data available

Mobility in soil

no data available

Results of PBT and vPvB assessment

no data available

Other adverse effects

Harmful to aquatic life.

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

13 DISPOSAL CONSIDERATIONS

Disposal method

Contact specialist disposal companies. Dispose of in accordance with Local Authority requirements. Recover and reclaim or recycle, if practical.

14 TRANSPORT INFORMATION

General

Not classified as dangerous for transport purposes.

UN No.

0

Road transport notes

Not classified as dangerous for road transport.

Rail transport notes

Not classified as dangerous for rail transport.

Sea transport notes

Not classified as dangerous for sea transport.

Air transport notes

Not classified as dangerous for air transport.

15 REGULATORY INFORMATION

This safety datasheet complies with the requirements of Regulation (EC) No. 1907/2006.

Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

no data available

Chemical Safety Assessment

no data available

Safety Data Sheet

1-Ethyl-3-methylimidazolium methanesulfonate

Revision Date: 12/01/2015

Date Issued: 12/12/2017

Country specific information

Germany

WGK: 3

(Self-Classification)

16 OTHER INFORMATION

DISCLAIMER

THE ABOVE INFORMATION IS BELIEVED TO BE CORRECT BUT DOES NOT PURPOSED TO BE ALL INCLUSIVE AND SHALL BE USED ONLY AS A GUIDE. IOLITEC SHALL NOT BE HELD LIABLE FOR ANY DAMAGE RESULTING FROM HANDLING OR FROM CONTACT WITH THE ABOVE PRODUCT. THIS INFORMATION RELATES ONLY TO THE SPECIFIC MATERIAL DESIGNATED AND MAY NOT BE VALID FOR SUCH MATERIAL USED IN COMBINATION WITH ANY OTHER MATERIALS OR ANY PROCESS. IT IS THE USER'S RESPONSIBILITY TO SATISFY HIMSELF AS TO THE SUITABILITY OF SUCH INFORMATION FOR HIS OWN PARTICULAR USE.

IN NO WAY SHALL IOLITEC BE LIABLE FOR ANY CLAIMS, LOSSES OR DAMAGES OF ANY THIRD PARTY OR FOR THE LOST PROFITS OR ANY SPECIAL, INDIRECT, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL OR EXEMPLARY DAMAGES, HOWSOEVER ARISING, EVEN IF THE COMPANY HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.



Material Safety Data Sheet

The Dow Chemical Company

Product Name: DOWTHERM* Q HEAT TRANSFER FLUID

Issue Date: 04/05/2012

Print Date: 06 Apr 2012

The Dow Chemical Company encourages and expects you to read and understand the entire (M)SDS, as there is important information throughout the document. We expect you to follow the precautions identified in this document unless your use conditions would necessitate other appropriate methods or actions.

1. Product and Company Identification

Product Name

DOWTHERM* Q HEAT TRANSFER FLUID

COMPANY IDENTIFICATION

The Dow Chemical Company
2030 Willard H. Dow Center
Midland, MI 48674
United States

Customer Information Number:

800-258-2436

EMERGENCY TELEPHONE NUMBER

24-Hour Emergency Contact:

989-636-4400

Local Emergency Contact:

989-636-4400

2. Hazards Identification

Emergency Overview

Color: Colorless to yellow

Physical State: Liquid.

Odor: Aromatic

Hazards of product:

WARNING! May cause allergic skin reaction. May cause eye irritation. May cause skin irritation. Aspiration hazard. Can enter lungs and cause damage. Isolate area. Highly toxic to fish and/or other aquatic organisms.

OSHA Hazard Communication Standard

This product is a "Hazardous Chemical" as defined by the OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 1910.1200.

Potential Health Effects

Eye Contact: May cause slight eye irritation. Corneal injury is unlikely.

Skin Contact: Brief contact may cause moderate skin irritation with local redness. Repeated contact may cause skin burns. Symptoms may include pain, severe local redness, swelling, and tissue damage.

Skin Absorption: Prolonged skin contact is unlikely to result in absorption of harmful amounts.

Skin Sensitization: Has demonstrated the potential for contact allergy in mice.

Inhalation: Prolonged exposure is not expected to cause adverse effects.

Ingestion: Very low toxicity if swallowed. Harmful effects not anticipated from swallowing small amounts.

Aspiration hazard: Aspiration into the lungs may occur during ingestion or vomiting, causing lung damage or even death due to chemical pneumonia.

Birth Defects/Developmental Effects: Has caused birth defects in laboratory animals only at doses toxic to the mother. Has been toxic to the fetus in laboratory animals at doses toxic to the mother.

3. Composition Information

Component	CAS #	Amount
Benzene, ethylenated, by-products from	68608-82-2	> 99.0 %

4. First-aid measures

Description of first aid measures

General advice: First Aid responders should pay attention to self-protection and use the recommended protective clothing (chemical resistant gloves, splash protection). If potential for exposure exists refer to Section 8 for specific personal protective equipment.

Inhalation: Move person to fresh air; if effects occur, consult a physician.

Skin Contact: Wash skin with plenty of water. Suitable emergency safety shower facility should be available in work area.

Eye Contact: Flush eyes thoroughly with water for several minutes. Remove contact lenses after the initial 1-2 minutes and continue flushing for several additional minutes. If effects occur, consult a physician, preferably an ophthalmologist.

Ingestion: Do not induce vomiting. Call a physician and/or transport to emergency facility immediately.

Most important symptoms and effects, both acute and delayed

Aside from the information found under Description of first aid measures (above) and Indication of immediate medical attention and special treatment needed (below), no additional symptoms and effects are anticipated.

Indication of immediate medical attention and special treatment needed

If burn is present, treat as any thermal burn, after decontamination. The decision of whether to induce vomiting or not should be made by a physician. If lavage is performed, suggest endotracheal and/or esophageal control. Danger from lung aspiration must be weighed against toxicity when considering emptying the stomach. No specific antidote. Treatment of exposure should be directed at the control of symptoms and the clinical condition of the patient.

5. Fire Fighting Measures

Suitable extinguishing media

Water fog or fine spray. Dry chemical fire extinguishers. Carbon dioxide fire extinguishers. Foam. General purpose synthetic foams (including AFFF type) or protein foams are preferred if available. Alcohol resistant foams (ATC type) may function.

Extinguishing Media to Avoid: Do not use direct water stream. May spread fire.

Special hazards arising from the substance or mixture

Hazardous Combustion Products: During a fire, smoke may contain the original material in addition to combustion products of varying composition which may be toxic and/or irritating. Combustion products may include and are not limited to: Carbon monoxide. Carbon dioxide.

Unusual Fire and Explosion Hazards: Violent steam generation or eruption may occur upon application of direct water stream to hot liquids. Liquid mist of this product can burn. Flammable concentrations of vapor can accumulate at temperatures above flash point; see Section 9. Dense smoke is produced when product burns.

Advice for firefighters

Fire Fighting Procedures: Keep people away. Isolate fire and deny unnecessary entry. Do not use direct water stream. May spread fire. Burning liquids may be moved by flushing with water to protect personnel and minimize property damage. Contain fire water run-off if possible. Fire water run-off, if not contained, may cause environmental damage. Review the "Accidental Release Measures" and the "Ecological Information" sections of this (M)SDS.

Special Protective Equipment for Firefighters: Wear positive-pressure self-contained breathing apparatus (SCBA) and protective fire fighting clothing (includes fire fighting helmet, coat, trousers, boots, and gloves). Avoid contact with this material during fire fighting operations. If contact is likely, change to full chemical resistant fire fighting clothing with self-contained breathing apparatus. If this is not available, wear full chemical resistant clothing with self-contained breathing apparatus and fight fire from a remote location. If protective equipment is not available or not used, fight fire from a protected location or safe distance.

6. Accidental Release Measures

Personal precautions, protective equipment and emergency procedures: Isolate area. Keep unnecessary and unprotected personnel from entering the area. Refer to Section 7, Handling, for additional precautionary measures. Use appropriate safety equipment. For additional information, refer to Section 8, Exposure Controls and Personal Protection.

Environmental precautions: Prevent from entering into soil, ditches, sewers, waterways and/or groundwater. See Section 12, Ecological Information. Spills or discharge to natural waterways is likely to kill aquatic organisms.

Methods and materials for containment and cleaning up: Contain spilled material if possible. Small spills: Absorb with materials such as: Non-combustible material. Collect in suitable and properly labeled containers. Large spills: Dike area to contain spill. Pump into suitable and properly labeled containers. Wash the spill site with water. See Section 13, Disposal Considerations, for additional information.

7. Handling and Storage

Handling

General Handling: Avoid contact with eyes, skin, and clothing. Do not swallow. Wash thoroughly after handling. See Section 8, EXPOSURE CONTROLS AND PERSONAL PROTECTION.

Other Precautions: Spills of these organic materials on hot fibrous insulations may lead to lowering of the autoignition temperatures possibly resulting in spontaneous combustion.

Storage

Store in the following material(s): Store in tightly closed container. Do not store in: Opened or unlabeled containers. See Section 10 for more specific information. Additional storage and handling information on this product may be obtained by calling your sales or customer service contact.

8. Exposure Controls / Personal Protection

Exposure Limits

Component	List	Type	Value
Dowtherm Q	Dow IHG	TWA	4 ppm
	AIHA WEEL	TWA	7.8 mg/m ³ 1 ppm

Personal Protection

Eye/Face Protection: Use safety glasses (with side shields).

Skin Protection: Use protective clothing chemically resistant to this material. Selection of specific items such as face shield, boots, apron, or full body suit will depend on the task.

Hand protection: Use gloves chemically resistant to this material. Examples of preferred glove barrier materials include: Viton. Polyethylene. Polyvinyl chloride ("PVC" or "vinyl"). Styrene/butadiene rubber. Polyvinyl alcohol ("PVA"). Ethyl vinyl alcohol laminate ("EVAL"). Examples of acceptable glove barrier materials include: Butyl rubber. Neoprene. Chlorinated polyethylene. Nitrile/butadiene rubber ("nitrile" or "NBR"). NOTICE: The selection of a specific glove for a particular application and duration of use in a workplace should also take into account all relevant workplace factors such as, but not limited to: Other chemicals which may be handled, physical requirements (cut/puncture protection, dexterity, thermal protection), potential body reactions to glove materials, as well as the instructions/specifications provided by the glove supplier.

Respiratory Protection: Respiratory protection should be worn when there is a potential to exceed the exposure limit requirements or guidelines. If there are no applicable exposure limit requirements or guidelines, wear respiratory protection when adverse effects, such as respiratory irritation or discomfort have been experienced, or where indicated by your risk assessment process. For most conditions no respiratory protection should be needed; however, if discomfort is experienced, use an approved air-purifying respirator. The following should be effective types of air-purifying respirators: Organic vapor cartridge with a particulate pre-filter.

Ingestion: Avoid ingestion of even very small amounts; do not consume or store food or tobacco in the work area; wash hands and face before smoking or eating.

Engineering Controls

Ventilation: Use local exhaust ventilation, or other engineering controls to maintain airborne levels below exposure limit requirements or guidelines. If there are no applicable exposure limit requirements or guidelines, general ventilation should be sufficient for most operations.

9. Physical and Chemical Properties

Appearance

Physical State

Liquid.

Color

Colorless to yellow

Odor

Aromatic

Odor Threshold

No test data available

pH

Not applicable

Melting Point

Not applicable to liquids

Freezing Point

< -40 °C (< -40 °F) *Literature*

Boiling Point (760 mmHg)

267 °C (513 °F) *Literature*

Flash Point - Closed Cup

121 °C (250 °F) *Setaflash Closed Cup ASTM D3278*

Flash Point - Open Cup

Cleveland Open Cup ASTM D92 None

Evaporation Rate (Butyl Acetate = 1)

<0.1 *Estimated*.

Flammable Limits In Air

Lower: 0.55 %(V) *Literature*

Upper: 5.5 %(V) *Literature*

Vapor Pressure

0.002 mmHg @ 25 °C *Literature*

Vapor Density (air = 1)

6.5 *Literature*

Specific Gravity (H₂O = 1)

0.97 20 °C/25 °C *Literature*

Solubility in water (by weight)	very low
Partition coefficient, n-octanol/water (log Pow)	4.08 - 6.01 <i>OECD Guideline 117 (Partition Coefficient (n-octanol / water), HPLC Method)</i>
Autoignition Temperature	412 °C (774 °F) <i>ASTM E659</i>
Decomposition Temperature	No test data available
Kinematic Viscosity	4.15 cSt @ 20 °C <i>Literature</i>
Molecular Weight	190 g/mol <i>Literature Average</i>

10. Stability and Reactivity

Reactivity

No dangerous reaction known under conditions of normal use.

Chemical stability

Thermally stable at typical use temperatures.

Possibility of hazardous reactions

Polymerization will not occur.

Conditions to Avoid: Exposure to elevated temperatures can cause product to decompose.

Incompatible Materials: Avoid contact with oxidizing materials.

Hazardous decomposition products

Decomposition products depend upon temperature, air supply and the presence of other materials. Decomposition products can include and are not limited to: Benzene.

11. Toxicological Information

Acute Toxicity

Ingestion

LD50, rat, male and female > 5,000 mg/kg

Inhalation

No deaths occurred following exposure to a saturated atmosphere. LC50, 1 h, Vapor, rat > 1.6 mg/l

Eye damage/eye irritation

May cause slight eye irritation. Corneal injury is unlikely.

Skin corrosion/irritation

Brief contact may cause moderate skin irritation with local redness. Repeated contact may cause skin burns. Symptoms may include pain, severe local redness, swelling, and tissue damage.

Sensitization

Skin

Has demonstrated the potential for contact allergy in mice.

Respiratory

Relevant data not available.

Repeated Dose Toxicity

Based on available data, repeated exposures are not anticipated to cause additional significant adverse effects.

Chronic Toxicity and Carcinogenicity

Relevant data not available.

Developmental Toxicity

Has caused birth defects in laboratory animals only at doses toxic to the mother. Has been toxic to the fetus in laboratory animals at doses toxic to the mother.

Reproductive Toxicity

In animal studies, did not interfere with reproduction. In animal studies, did not interfere with fertility.

Genetic Toxicology

In vitro genetic toxicity studies were negative.

12. Ecological Information**Toxicity**

Material is highly toxic to aquatic organisms on an acute basis (LC50/EC50 between 0.1 and 1 mg/L in the most sensitive species tested).

Aquatic Invertebrate Acute Toxicity

EC50, Ceriodaphnia Dubia (water flea), static test, 48 h, immobilization: 0.17 mg/l

Persistence and Degradability

Based on stringent OECD test guidelines, this material cannot be considered as readily biodegradable; however, these results do not necessarily mean that the material is not biodegradable under environmental conditions. Material is inherently biodegradable (reaches > 20% biodegradation in OECD test(s) for inherent biodegradability).

OECD Biodegradation Tests:

Biodegradation	Exposure Time	Method	10 Day Window
40.6 %	29 d	OECD 301B Test	fail

Theoretical Oxygen Demand: 3.07 mg/mg

Bioaccumulative potential

Bioaccumulation: Bioconcentration potential is moderate (BCF between 100 and 3000 or Log Pow between 3 and 5).

Partition coefficient, n-octanol/water (log Pow): 4.08 - 6.01 OECD Guideline 117 (Partition Coefficient (n-octanol / water), HPLC Method)

Mobility in soil

Mobility in soil: Expected to be relatively immobile in soil (Koc > 5000).

Partition coefficient, soil organic carbon/water (Koc): > 5,000

13. Disposal Considerations

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. All disposal practices must be in compliance with all Federal, State/Provincial and local laws and regulations. Regulations may vary in different locations. Waste characterizations and compliance with applicable laws are the responsibility solely of the waste generator. AS YOUR SUPPLIER, WE HAVE NO CONTROL OVER THE MANAGEMENT PRACTICES OR MANUFACTURING PROCESSES OF PARTIES HANDLING OR USING THIS MATERIAL. THE INFORMATION PRESENTED HERE PERTAINS ONLY TO THE PRODUCT AS SHIPPED IN ITS INTENDED CONDITION AS DESCRIBED IN MSDS SECTION: Composition Information. FOR UNUSED & UNCONTAMINATED PRODUCT, the preferred options include sending to a licensed, permitted: Recycler. Reclaimer. Incinerator or other thermal destruction device.

14. Transport Information**DOT Non-Bulk**

NOT REGULATED

DOT Bulk

NOT REGULATED

IMDG**Proper Shipping Name:** ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, LIQUID, N.O.S.**Technical Name:** Benzene, ethylenated, by-products from**Hazard Class:** 9 **ID Number:** UN3082 **Packing Group:** PG III**EMS Number:** F-A,S-F**Marine pollutant.:** Yes**ICAO/IATA****Proper Shipping Name:** ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCE, LIQUID, N.O.S.**Technical Name:** Benzene, ethylenated, by-products from**Hazard Class:** 9 **ID Number:** UN3082 **Packing Group:** PG III**Cargo Packing Instruction:** 964**Passenger Packing Instruction:** 964**Additional Information**

MARINE POLLUTANT

This information is not intended to convey all specific regulatory or operational requirements/information relating to this product. Additional transportation system information can be obtained through an authorized sales or customer service representative. It is the responsibility of the transporting organization to follow all applicable laws, regulations and rules relating to the transportation of the material.

15. Regulatory Information**OSHA Hazard Communication Standard**

This product is a "Hazardous Chemical" as defined by the OSHA Hazard Communication Standard, 29 CFR 1910.1200.

Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 Title III (Emergency Planning and Community Right-to-Know Act of 1986) Sections 311 and 312**Immediate (Acute) Health Hazard** Yes**Delayed (Chronic) Health Hazard** No**Fire Hazard** No**Reactive Hazard** No**Sudden Release of Pressure Hazard** No**Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986 Title III (Emergency Planning and Community Right-to-Know Act of 1986) Section 313**

To the best of our knowledge, this product does not contain chemicals at levels which require reporting under this statute.

Pennsylvania (Worker and Community Right-To-Know Act): Pennsylvania Hazardous Substances List and/or Pennsylvania Environmental Hazardous Substance List:

To the best of our knowledge, this product does not contain chemicals at levels which require reporting under this statute.

Pennsylvania (Worker and Community Right-To-Know Act): Pennsylvania Special Hazardous Substances List:

To the best of our knowledge, this product does not contain chemicals at levels which require reporting under this statute.

California Proposition 65 (Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act of 1986)

This product contains no listed substances known to the State of California to cause cancer, birth defects or other reproductive harm, at levels which would require a warning under the statute.

US. Toxic Substances Control Act

All components of this product are on the TSCA Inventory or are exempt from TSCA Inventory requirements under 40 CFR 720.30

CEPA - Domestic Substances List (DSL)

All substances contained in this product are listed on the Canadian Domestic Substances List (DSL) or are not required to be listed.

16. Other Information**Hazard Rating System**

NFPA	Health	Fire	Reactivity
	1	1	0

Recommended Uses and Restrictions**Identified uses**

Intended as a heat transfer fluid for closed-loop systems. For industrial use only. We recommend that you use this product in a manner consistent with the listed use. If your intended use is not consistent with the stated use, please contact your sales or technical service representative.

Revision

Identification Number: 50465 / 0000 / Issue Date 04/05/2012 / Version: 8.0

Most recent revision(s) are noted by the bold, double bars in left-hand margin throughout this document.

Legend

N/A	Not available
W/W	Weight/Weight
OEL	Occupational Exposure Limit
STEL	Short Term Exposure Limit
TWA	Time Weighted Average
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc.
DOW IHG	Dow Industrial Hygiene Guideline
WEEL	Workplace Environmental Exposure Level
HAZ_DES	Hazard Designation
Action Level	A value set by OSHA that is lower than the PEL which will trigger the need for activities such as exposure monitoring and medical surveillance if exceeded.

The Dow Chemical Company urges each customer or recipient of this (M)SDS to study it carefully and consult appropriate expertise, as necessary or appropriate, to become aware of and understand the data contained in this (M)SDS and any hazards associated with the product. The information herein is provided in good faith and believed to be accurate as of the effective date shown above. However, no warranty, express or implied, is given. Regulatory requirements are subject to change and may differ between various locations. It is the buyer's/user's responsibility to ensure that his activities comply with all federal, state, provincial or local laws. The information presented here pertains only to the product as shipped. Since conditions for use of the product are not under the control of the manufacturer, it is the buyer's/user's duty to determine the conditions necessary for the safe use of this product. Due to the proliferation of sources for information such as manufacturer-specific (M)SDSs, we are not and cannot be responsible for (M)SDSs obtained from any source other than ourselves. If you have obtained an (M)SDS from another source or if you are not sure that the (M)SDS you have is current, please contact us for the most current version.

DOCUMENTO II: PLANOS

ÍNDICE DE PLANOS

1. Plano de situación (escala 1:20 000)
2. Plano de emplazamiento (escala 1:2 000)¹
3. Plano de implantación (escala 1:500)²
4. Diagrama de flujo de proceso (PFD)
5. Diagrama de tuberías e instrumentación 1 (P&ID #1)
6. Diagrama de tuberías e instrumentación 2 (P&ID #2)
7. Diagrama de diseño mecánico del reactor catalítico heterogéneo R-201³

¹ El plano número 2 (emplazamiento) ha sido adaptado con permiso, partiendo de la página web oficial del Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro (<https://bit.ly/2JPghaZ>) de libre acceso.

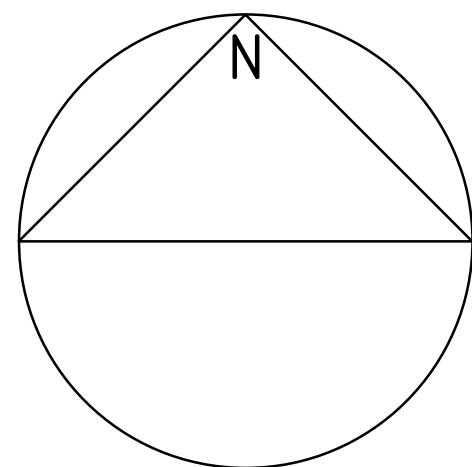
² El plano número 3 (implantación o *layout*) introduce las distancias de seguridad en base a las guías 2.5.2 propuestas por la *Global Asset Protection Services* (GAPS) para plantas químicas y de aceites.

³ El plano número 7 (diseño mecánico) incluye una representación esquemática del soporte de falda. Para su diseño riguroso se recomienda acudir a la siguiente referencia bibliográfica: BROWNELL L, YOUNG E. *Process equipment design: vessel design*. Chapter 10: design of supports for vertical vessels. 1ª edición. New York (USA): Ed. John Wiley & Sons, 1959, pp. 183-202. Library of Congress Catalog Card Number: 59-5882.



ESCALA GRÁFICA

500m 0 500 1000m



Mapa ortofotográfico obtenido de la Sede Electrónica del Catastro, de libre acceso.
Sistema de información de ordenación de territorio y urbanismo de Galicia (SIOTUGA):
Plan Xeral de Ordenación Municipal del Concello de Curtis, de mayo 2007.

PXOM aprobado por el Pleno del Concello de Curtis en junio 2007 y por la Conselleira de Política Territorial, Obras Públicas y Transportes en septiembre del mismo año, con el visto bueno del Jefe de servicio de Planificación Urbanística.

LEYENDA

- Núcleo de Teixeira
- Centro Penitenciario
- Parcelas seleccionadas para emplazamiento
- Polígono Industrial Teixeira

Escola Técnica Superior de Enxeñaría
Universidade de Santiago de Compostela

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO MEDIANTE DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ETANOL

Título de plano: Plano de situación

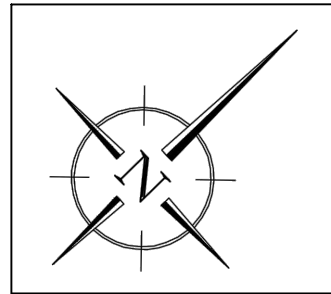
Nº de plano: 1/7

Escala: 1 : 20 000

Autor: Carlos M. Corral Casas

Firma:

Fecha: Julio 2018



Coordenadas UTM. Huso 29 Hemisferio Norte

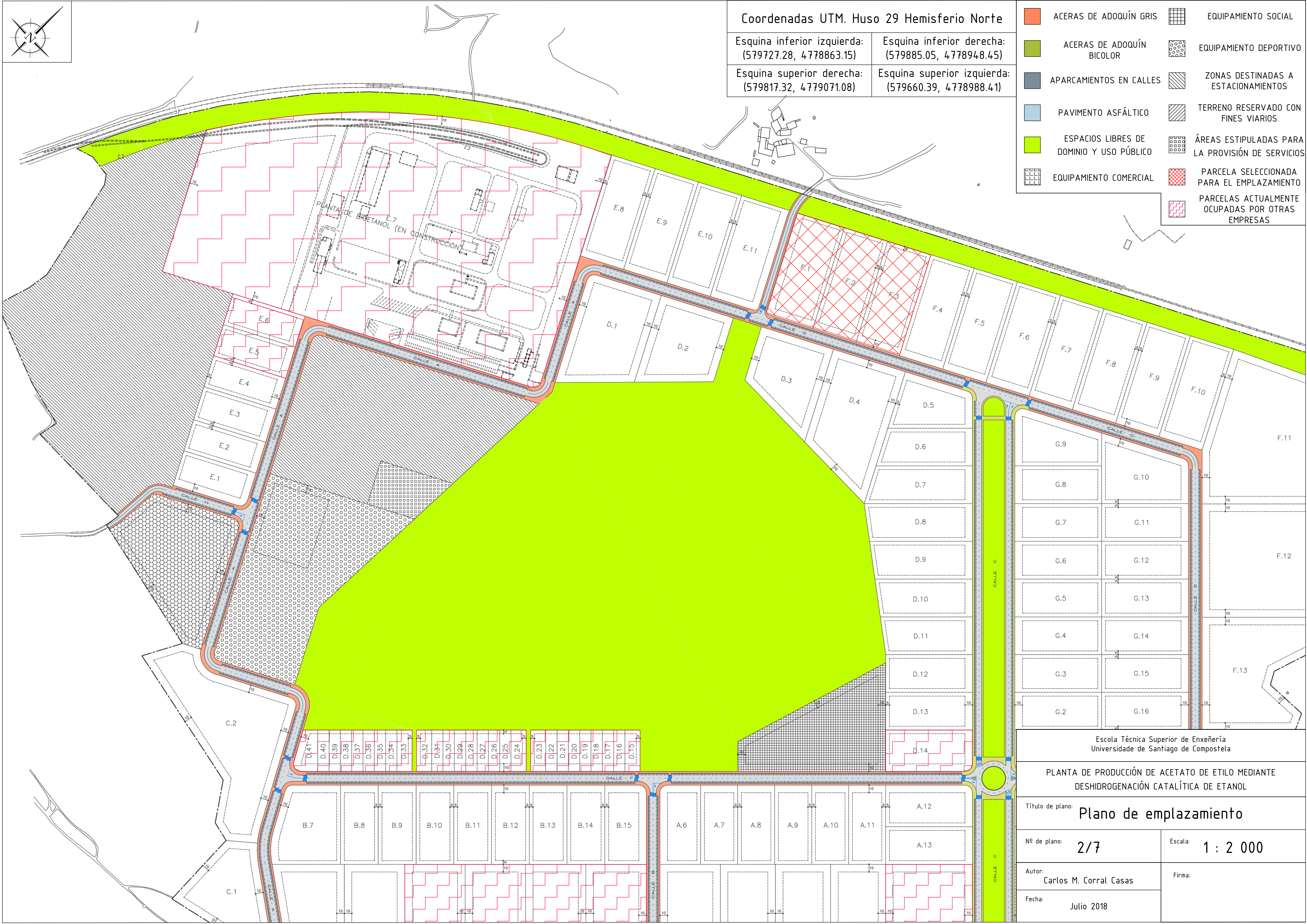
Esquina inferior izquierda:
(579727.28, 4778863.15)

Esquina inferior derecha:
(579885.05, 4778948.45)

Esquina superior derecha:
(579817.32, 4779071.08)

Esquina superior izquierda:
(579660.39, 4778988.41)

	ACERAS DE ADOQUÍN GRIS		EQUIPAMIENTO SOCIAL
	ACERAS DE ADOQUÍN BICOLOR		EQUIPAMIENTO DEPORTIVO
	APARCAMIENTOS EN CALLES		ZONAS DESTINADAS A ESTACIONAMIENTOS
	PAVIMENTO ASFÁLTICO		TERRENO RESERVADO CON FINES VIARIOS
	ESPACIOS LIBRES DE DOMINIO Y USO PÚBLICO		ÁREAS ESTIPULADAS PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS
	EQUIPAMIENTO COMERCIAL		PARCELA SELECCIONADA PARA EL EMPLAZAMIENTO
			PARCELAS ACTUALMENTE OCUPADAS POR OTRAS EMPRESAS



Escola Técnica Superior de Enxeñaría
Universidade de Santiago de Compostela

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO MEDIANTE
DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ETANOL

Título de plano: **Plano de emplazamiento**

Nº de plano: **2/7**

Escala: **1 : 2 000**

Autor:
Carlos M. Corral Casas

Firma:

Fecha:
Julio 2018

VÍA DE FERROCARRIL: A CORUÑA - MADRID

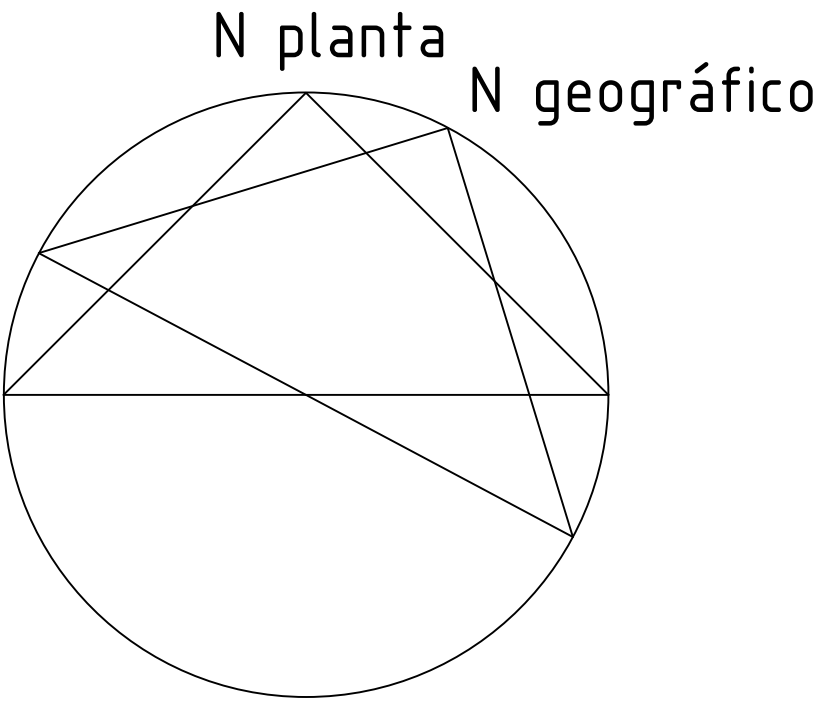
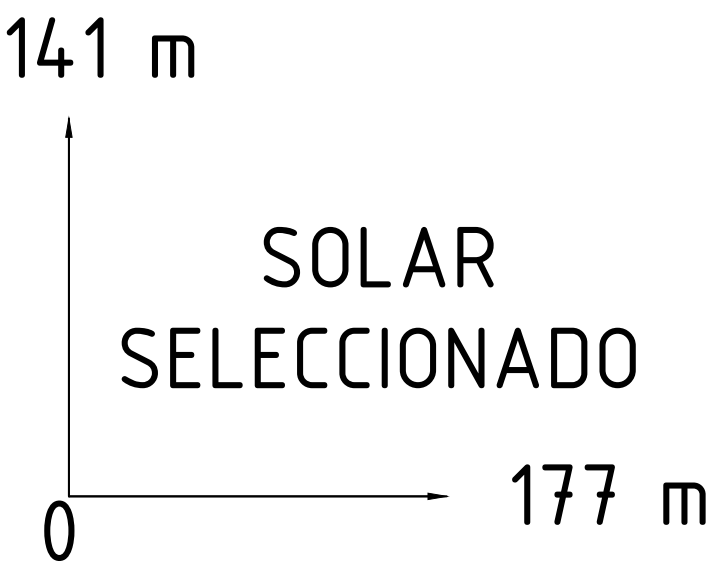
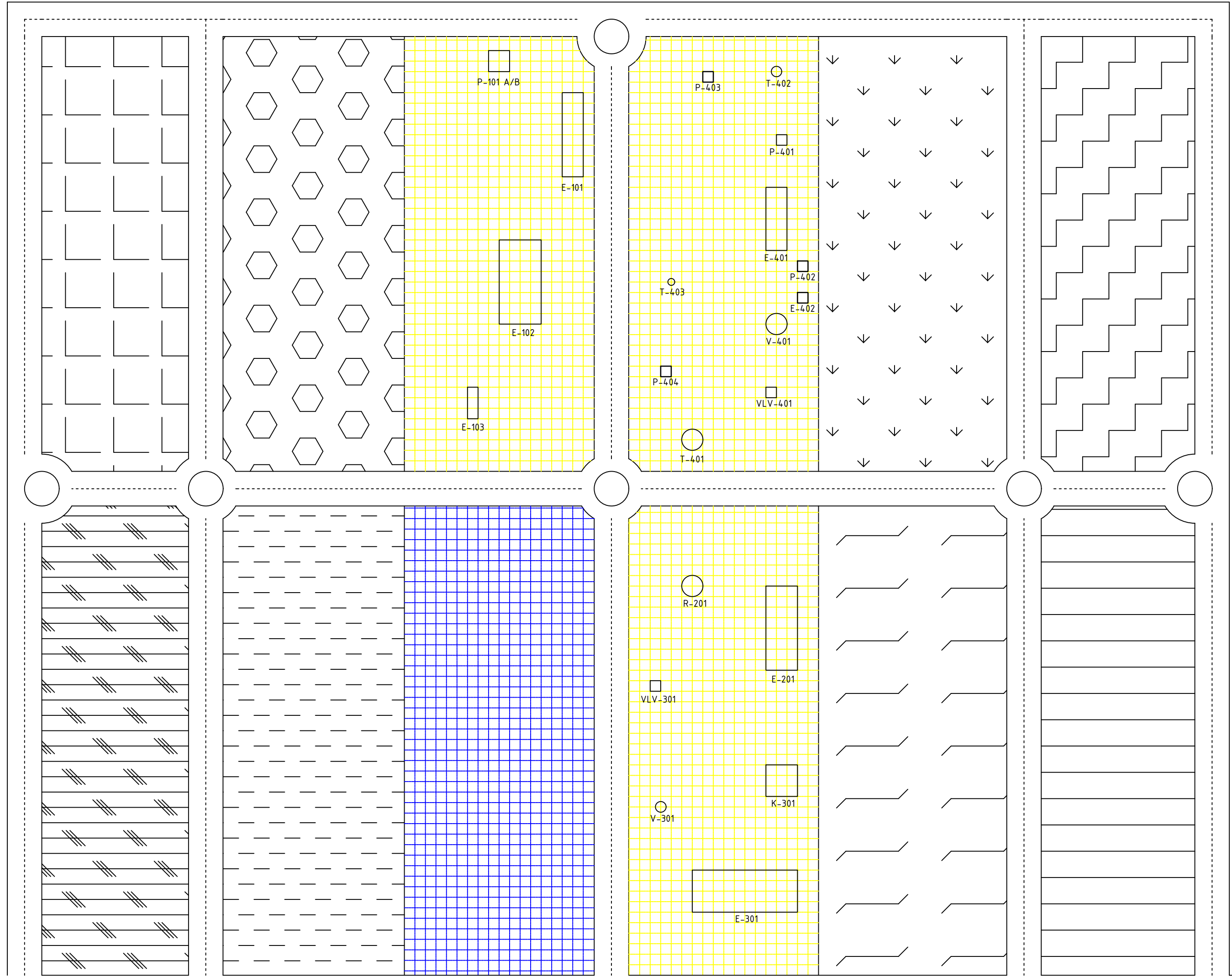
PARCELA SUSCEPTIBLE DE
ACONDICIONAMIENTO PARA
AUMENTO DE PLAZAS DE
ESTACIONAMIENTO

BIOVIGO ENERGY S.L.

ACERAS PARA PEATONES

RÚA MESÍA

ZONAS DE ESTACIONAMIENTO PARA PERSONAL



NOTAS

- LA ZONA MARCADA CON CUADRÍCULA AZUL ESTÁ DESTINADA A AMPLIACIONES.
- LA CUADRÍCULA TIENE UNA LUZ DE MALLA DE 5 PIES, DISTANCIA DE SEGURIDAD MÍNIMA CONSIDERADA POR LA REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA EMPLEADA.

LEYENDA

	ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS Y REACTIVOS		LABORATORIO DE ANÁLISIS DE CALIDAD Y CONTROL
	SECCIÓN DE GENERACIÓN DE UTILIDADES		VESTUARIOS PARA PERSONAL DE PLANTA
	ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS		ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE EFLUENTES LÍQUIDOS
	EDIFICIOS DE SERVICIOS Y TALLER		SALA DE CONTROL

Escola Técnica Superior de Enxeñería
Universidade de Santiago de Compostela

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO MEDIANTE
DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ETANOL

Título de plano: **Plano de implantación**

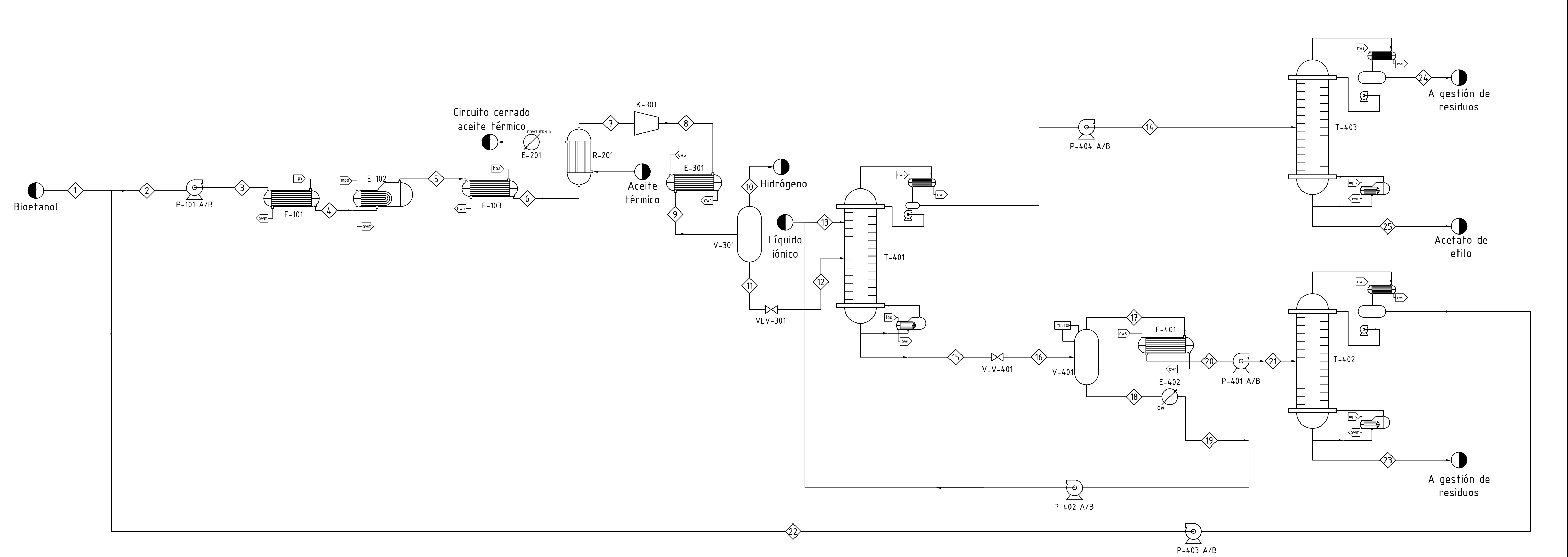
Nº de plano: **3/7** Escala: **1 : 500**

Autor: **Carlos M. Corral Casas**

Firma:

Fecha: **Julio 2018**

P-101 A/B BOMBA CENTRÍFUGA	E-101 PRECALENTADOR ALIMENTACIÓN	E-102 EVAPORADOR ALIMENTACIÓN	E-103 CALENTADOR DE ALIMENTACIÓN GAS	R-201 REACTOR CATALÍTICO HETEROGÉNEO	E-201 INTERCAMBIADOR CIRCUITO ACEITE	K-301 COMPRESOR RECIPROCANTE	E-301 CONDENSADOR PARCIAL PARA AISLAMIENTO DE H ₂	V-301 TAMBOR FLASH PARA SEPARACIÓN DE H ₂	VLV-301 VÁLVULA DE EXPANSIÓN
T-401 COLUMNA DE DESTILACIÓN AZEOTRÓPICA	VLV-401 VÁLVULA DE EXPANSIÓN	V-401 TANQUE DE RECUPERACIÓN DE LÍQUIDO IÓNICO	P-402 A/B BOMBA CENTRÍFUGA CIRCUITO L.I.	E-401 CONDENSADOR TOTAL DE LA LÍNEA DE RECICLO	P-401 A/B BOMBA CENTRÍFUGA	T-402 TORRE DE PURIFICACIÓN DE RECICLO	P-403 A/B BOMBA CENTRÍFUGA	T-403 TORRE DE PURIFICACIÓN DE PRODUCTO	P-404 A/B BOMBA CENTRÍFUGA



LEYENDA DE UTILIDADES

- lps: vapor de agua de baja presión

mps: vapor de agua de media presión

hps: vapor de agua de alta presión

cws: suministro de agua de enfriamiento

rws: suministro de agua de refrigeración
- bwl: agua de calderas de baja presión

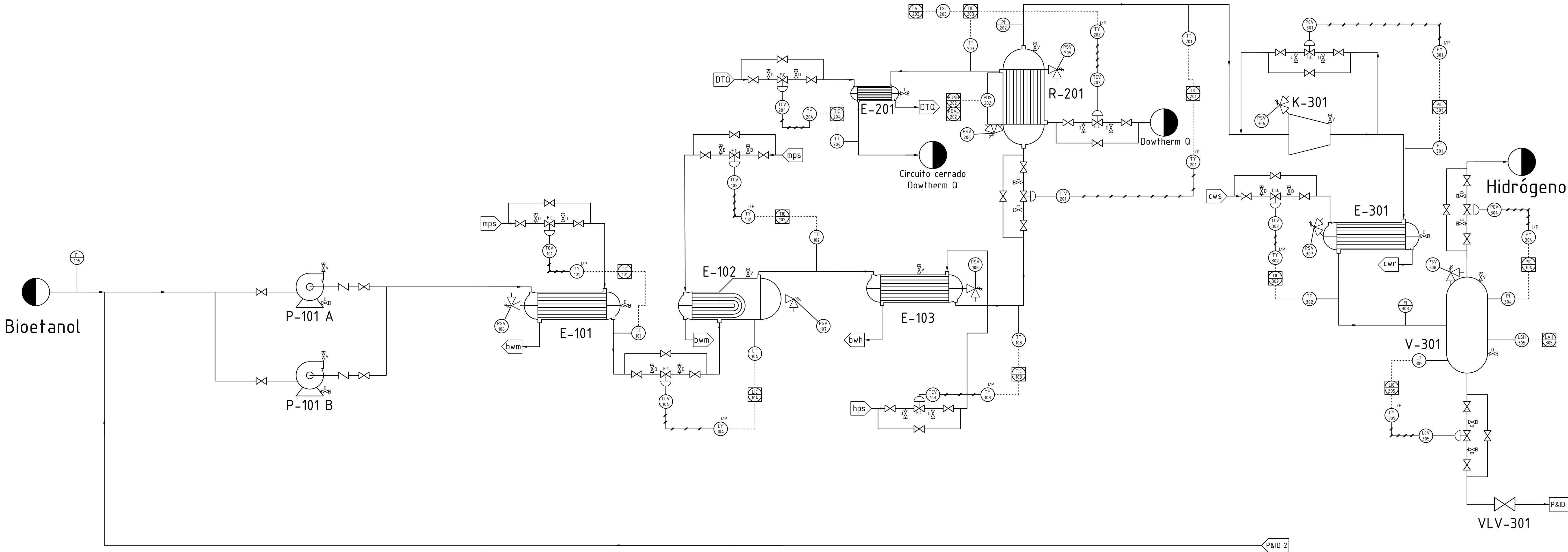
bwm:agua de calderas de media presión

bwh: agua de calderas de alta presión






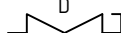


cwr: retorno de agua de enfriamiento

rwr: retorno de agua de refrigeración

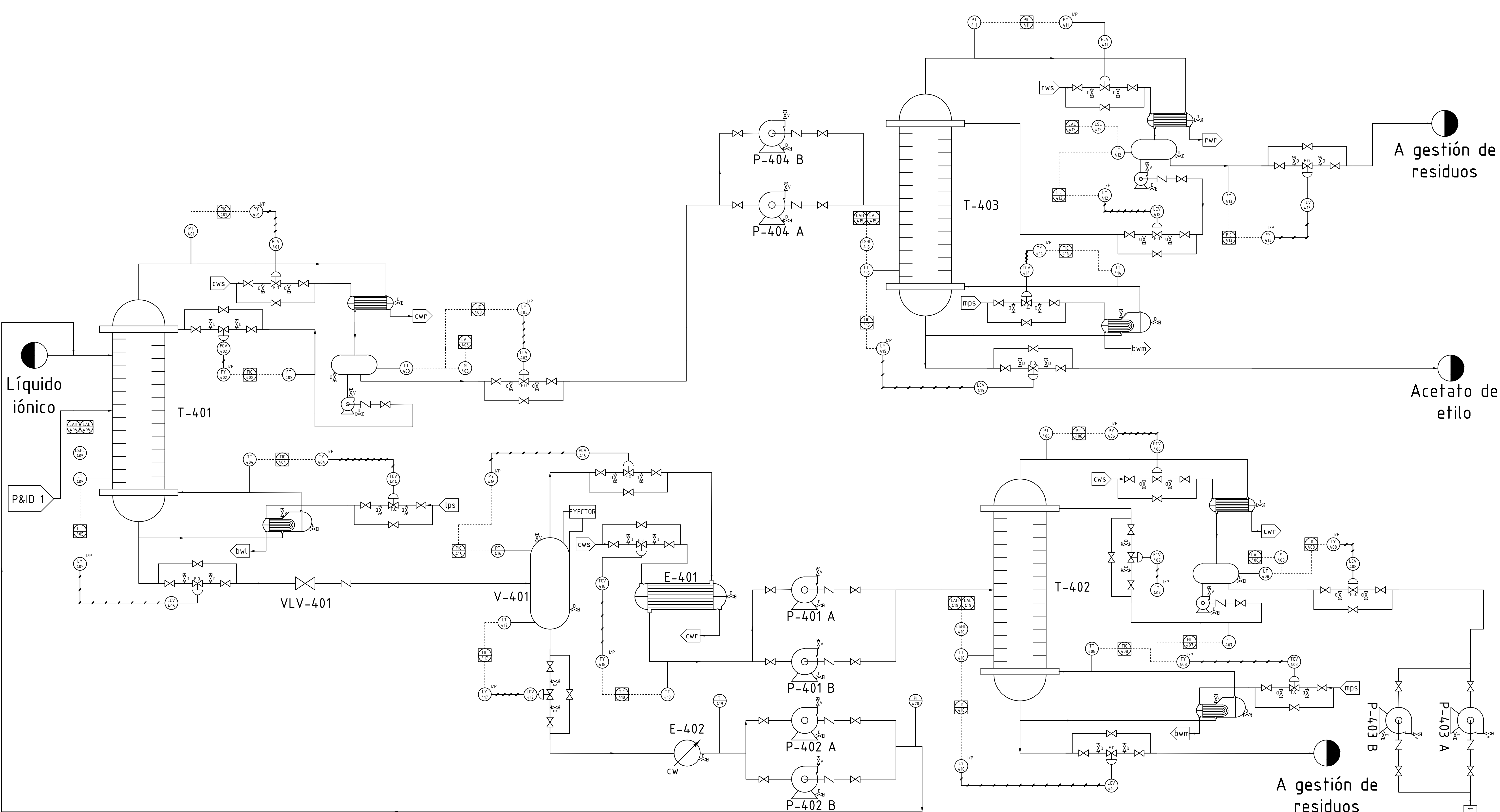
Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Escola Técnica Superior de Enxeñería Universidade de Santiago de Compostela		
Temperatura (°C)	25	25	25	179.7	179.7	220	220	235.17	35	35	35	35	35	66.67	78.03	78.03	78.03	78.03	35	61.5	61.5	77.84	171	20.31	76.74			
Presión (bar)	1	1	20.6	20.3	20.2	20	19.81	25	24.9	24.9	24.9	1	1	0.95	1.05	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	1	0.97	1.03	0.98	1.02	PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO MEDIANTE DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ETANOL		
Fracción de vapor	0	0	0	0	1	1	1	1	0.03	1	0	0	0	0	0	0.82	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
Flujo molar (kmol/h)	149.38	228.66	228.66	228.66	228.66	228.66	302.50	302.50	302.50	146.16	156.34	156.34	4.01	76.46	83.89	83.89	79.88	4.01	4.01	79.88	79.88	79.28	0.60	4.56	71.90	Título de plano: Diagrama de flujo (PFD)		
Flujo másico total (kg/h)	6875.31	10527.51	10527.51	10527.51	10527.51	10527.51	10527.51	10527.51	10527.51	294.65	10232.86	10232.86	826.84	6527.58	4532.12	4532.12	3705.28	826.84	826.84	3705.28	3705.28	3652.20	53.09	203.73	6323.85			
Flujo etanol (kg/h)	6733.46	10385.66	10385.66	10385.66	10385.66	10385.66	3652.20	3652.20	3652.20	0.00	3652.20	3652.20	0.00	0.00	3652.20	3652.20	3652.20	0.00	0.00	3652.20	3652.20	3652.20	0.00	0.00	0.00	Nº de plano: 4/7		Escala: S/E
Flujo acetaldéhid (kg/h)	141.85	141.85	141.85	141.85	141.85	141.85	208.76	208.76	208.76	0.00	208.76	208.76	0.00	208.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	198.04	10.72			
Flujo acetato de etilo (kg/h)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6318.82	6318.82	6318.82	0.00	6318.82	6318.82	0.00	6318.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.69	6313.13	Autor: Carlos M. Corral Casas		Firma:
Flujo hidrógeno (kg/h)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	294.65	294.65	294.65	294.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Flujo acetaldol (kg/h)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.09	53.09	53.09	0.00	53.09	53.09	0.00	0.00	53.09	53.09	53.09	0.00	0.00	53.09	53.09	0.00	53.09	0.00	0.00	Fecha: Julio 2018		
Flujo [emim][MeSO3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	826.84	0.00	826.84	826.84	0.00	826.84	826.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			



NOMENCLATURA DE LOS EQUIPOS	
X-YZZ A/B	
X	Letra que define el tipo de equipo
Y	Sección a la que pertenece el equipo
ZZ	Número del equipo de su mismo tipo
A/B	Equipos en paralelo

NOMENCLATURA				SIMBOLOGÍA					
<div><div><div>XXX</div><div>ABB</div></div><div>X: Primera letra Y: Letras sucesivas A: Nº de sección BB: Nº de lazo</div></div>				INSTRUMENTOS		VÁLVULAS		LÍNEAS	
				Según localización		Según función			Válvula de corte
<div><div><div>XXX</div><div>ABB</div></div><div>Instrumento montado en planta</div></div>				<div><div><div>XXX</div><div>ABB</div></div><div>Instrumento discreto</div></div>			Válvula de control		Señal eléctrica
							Válvula antirretorno		Señal neumática
PRIMERA LETRA				LETRAS SUCESIVAS					
F	Flujo	A	Alarma				Válvula de drenaje		
L	Nivel	C	Controlador				Válvula de venteo		
T	Temperatura	H	Alto				Válvula de alivio		
P	Presión	I	Indicador			Posición de fallo: F.O. Falto abrir F.C. Falto cerrar			
		L	Bajo						
		S	Interrupor						
		T	Transmisor						
		V	Válvula						
		Y	Conversor						

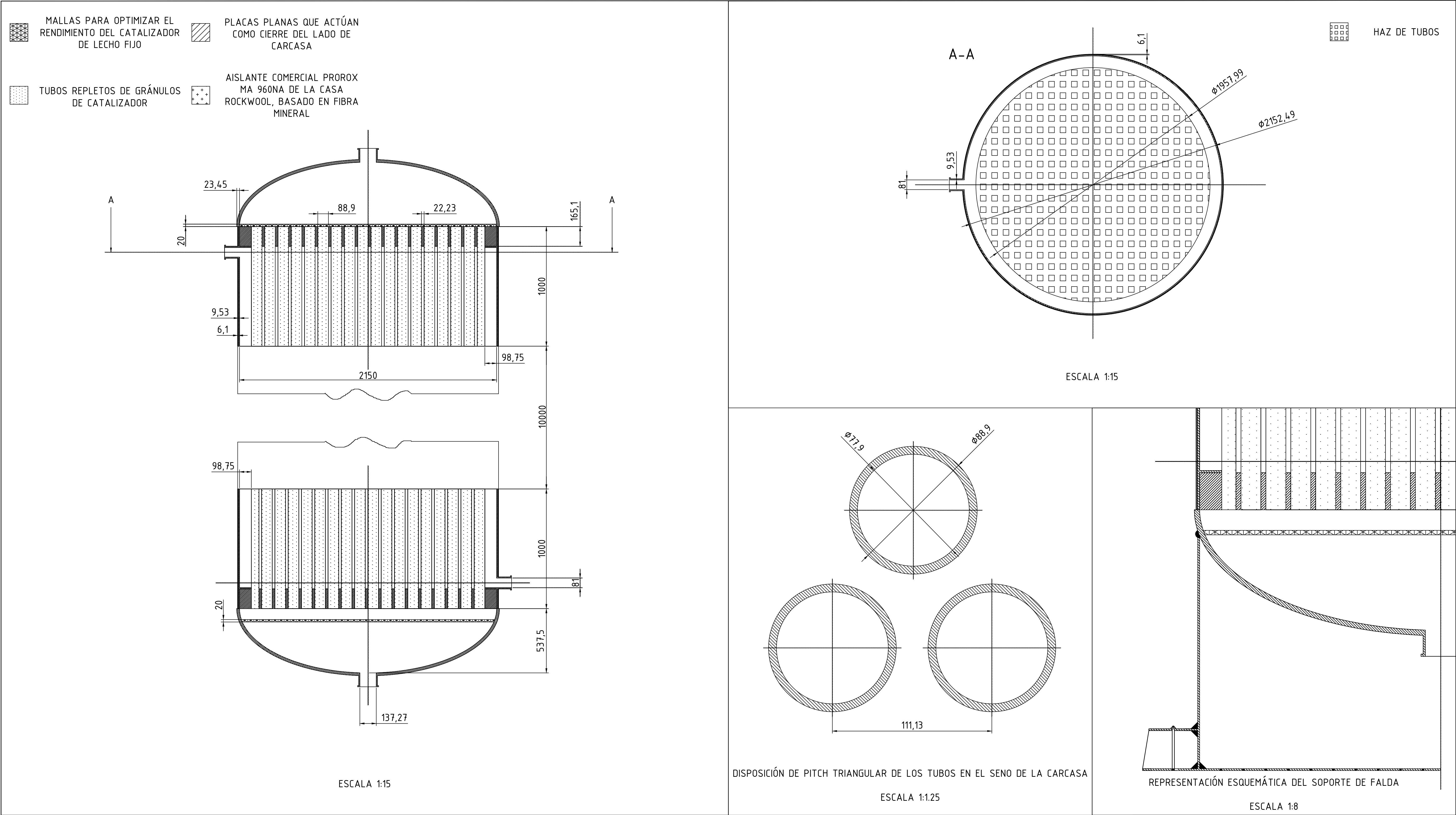
Escola Técnica Superior de Enxeñaría Universidade de Santiago de Compostela	
PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO MEDIANTE DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ETANOL	
Título de plano: P&ID #1	
Nº de plano: 5/7	Escala: S/E
Autor: Carlos M. Corral Casas	Firma:
Fecha: Julio 2018	



NOMENCLATURA DE LOS EQUIPOS	
X-YYZ A/B	
X	Letra que define el tipo de equipo
Y	Sección a la que pertenece el equipo
ZZ	Número de equipo de su mismo tipo
A/B	Equipos en paralelo

NOMENCLATURA				SIMBOLOGÍA					
<div><div>XXX</div><div>ABB</div></div> <div>X: Primera letra Y: Letras sucesivas A: Nº de sección BB: Nº de lazo</div>				INSTRUMENTOS		VÁLVULAS		LÍNEAS	
				Según localización		Según función			
				<div><div>XXX</div><div>ABB</div></div> <div>Instrumento montado en planta</div>	<div><div>XXX</div><div>ABB</div></div> <div>Instrumento discreto</div>	<div></div> <div>Válvula de corte</div>	<div></div> <div>Conexión con el proceso</div>		
				<div><div>XXX</div><div>ABB</div></div> <div>Instrumento montado en sala de control</div>	<div></div> <div>Válvula de control</div>	<div></div> <div>Señal eléctrica</div>			
					<div></div> <div>Válvula antirretorno</div>	<div></div> <div>Señal neumática</div>			
				<div><div>XXX</div><div>ABB</div></div> <div>Instrumento que lleva a cabo alguna función de control</div>	<div></div> <div>Válvula de drenaje</div>				
					<div></div> <div>Válvula de venteo</div>				
					<div></div> <div>Válvula de alivio</div>				
						Posición de fallo: F.O. Fallo abrir F.C. Fallo cerrar			
PRIMERA LETRA				LETRAS SUCESIVAS					
F	Flujo	A	Alarma						
L	Nivel	C	Controlador						
T	Temperatura	H	Alto						
P	Presión	I	Indicador						
				L	Bajo				
				S	Interruptor				
				T	Transmisor				
				V	Válvula				
				Y	Conversor				

Escola Técnica Superior de Enxeñaría Universidade de Santiago de Compostela	
PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ACETATO DE ETILO MEDIANTE DESHIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ETANOL	
Título de plano: P&ID #2	
Nº de plano: 6/7	Escala: S/E
Autor: Carlos M. Corral Casas	Firma:
Fecha: Julio 2018	



**DOCUMENTO III:
PLIEGO DE
CONDICIONES**

Contenido

1.	Disposiciones generales pliego de condiciones generales.....	6
1.1	Objeto	6
1.2	Concurso	6
1.3	Contrato	7
1.4	Programa.....	8
1.5	Estudios y documentación técnica	9
1.6	Pliegos, Instrucciones y Normas aplicables	11
1.7	Seguridad y accidentes de trabajo.....	12
2.	Calidad de los materiales	13
2.1	Materiales en general	13
2.2	Aceros	13
2.3	Resto de los materiales utilizados	13
3.	Normas de cálculo	13
4.	Disposiciones generales de las obras	14
4.1	Replanteo de la obra.....	14
4.2	Plazo de ejecución	14
4.3	Mano de obra.....	14
4.4	Mejoras y variaciones en el proyecto	16
4.5	Contradicciones, omisiones o errores en los documentos.....	16
4.6	Trabajos defectuosos o no autorizados.....	16
4.7	Suspensión de las obras.....	17
4.8	Seguros.....	18
5.	Ensayos, pruebas y protecciones	19
5.1	Ensayos en taller	19
5.2	Presentación en taller	19
5.3	Protección contra la corrosión.....	19
5.3.1	Intercambiadores de calor	20
5.3.2	Tuberías	21
5.3.3	Columnas y depósitos a presión.....	21
5.3.4	Bombas	21
6.	Fabricación, montaje, recepción y garantías	22
6.1	Inspección fabril.....	22

6.2	Montaje e inspección.....	22
6.3	Controles.....	23
6.3.1	Intercambiadores de calor	23
6.3.2	Tuberías	23
6.3.3	Columnas y depósitos a presión.....	23
6.3.4	Bombas	24
6.3.5	Prueba hidráulica en taller	24
6.4	Acta de fin de montaje.....	24
6.5	Ajustes, ensayos y servicio experimental	24
6.6	Recepción provisional	25
6.7	Periodo de garantía.....	25
6.8	Recepción definitiva.....	26
7.	Almacenamiento, transporte y seguros.....	26
7.1	Almacenamiento.....	26
7.2	Transporte.....	27
7.3	Seguros de transporte	27
7.4	Importación de materiales y equipos	27
8.	Organización de las obras	28
8.1	Dirección de las obras y representación del Adjudicatario	28
8.2	Terrenos para la ejecución de las obras	29
8.3	Instalaciones auxiliares	29
8.4	Relación entre la Propiedad y el Adjudicatario	30
8.5	Subcontratación de obras	31
8.6	Personal de montaje	32
8.7	Seguros y asistencia médica	32
9.	Abono de las obras.....	33
9.1	Definición de precios	33
9.2	Prestaciones accesorias y trabajos por admisión	33
9.3	Trabajos no previstos.....	34
9.4	Revisión de precios	35
9.5	Condiciones de pago.....	36
9.6	Penalizaciones.....	36
9.7	Indemnización a favor del Adjudicatario	37

9.8	Rescisión del contrato.....	37
9.9	Legislación.....	39
1.	Disposiciones generales pliego de condiciones particulares	40
1.1	Objeto	40
2.	Edificación	40
2.1	Condiciones generales	40
2.1.1	Calidad de los materiales.....	40
2.1.2	Pruebas y ensayos de materiales	40
2.1.3	Materiales no previstos en el Proyecto.....	40
2.1.4	Condiciones generales de ejecución de las obras	40
2.2	Condiciones a cumplir por los materiales.....	41
2.2.1	Materiales para hormigones y morteros.....	41
2.2.2	Aceros	42
2.2.3	Materiales auxiliares para el hormigón.....	43
2.2.4	Encofrados y cimbras.....	43
2.2.5	Aglomerantes excluyendo el cemento	43
2.2.6	Materiales para fábrica	44
2.2.7	Pintura	44
2.2.8	Colores, aceites y barnices	44
2.2.9	Fontanería.....	45
2.3	Condiciones para la ejecución de las obras	45
2.3.1	Movimiento de tierras.....	45
2.3.2	Hormigón	46
2.3.3	Morteros.....	49
2.3.4	Encofrados	49
2.3.5	Armaduras	50
2.3.6	Albañilería.....	50
2.3.7	Carpintería metálica	51
2.3.8	Pintura	51
2.4	Control de la obra	52
2.4.1	Componentes del hormigón.....	52
2.4.2	Hormigón	52
2.4.3	Armaduras	52

2.4.4	Formas y disposición	52
2.4.5	Ensayos informativos.....	53
2.5	Instrucción del hormigón estructural	53
2.5.1	Cemento	53
2.5.2	Agua de amasado	53
2.5.3	Áridos.....	53
2.6	Condiciones de protección contra incendios en edificios	53
2.6.1	Condiciones técnicas exigibles a los materiales	53
2.6.2	Condiciones técnicas exigibles a los elementos constructivos	54
3.	Instalación eléctrica	54
3.1	Generalidades	54
3.2	Identificación	55
3.3	Conductores.....	55
3.4	Terminales.....	55
3.5	Instalación de aparatos.....	55
3.6	Cuadros de distribución	56
3.7	Instalaciones de fuerza y alumbrado.....	56
3.8	Equilibrio de fases.....	56
3.9	Acometida general.....	56
3.10	Caja de protección	56
3.11	Línea de reparto.....	56
3.12	Contadores.....	57
3.13	Derivaciones individuales	57
3.14	Instalación.....	57
3.15	Instalación de puesta a tierra	57
3.16	Inspecciones, pruebas y recepciones	57
4.	Instalaciones mecánicas.....	58
4.1	General.....	58
4.2	Materiales	58
4.2.1	Accesorios.....	59
4.2.2	Soportes.....	59
4.2.3	Recipientes a presión	59
4.3	Condiciones de ejecución	59

4.3.1	Tuberías y accesorios.....	59
4.3.2	Soportes y estructuras.....	62
4.4	Pinturas y aislamiento.....	63
4.4.1	Soportes.....	64
4.5	Control de calidad. Inspección y pruebas	64
4.5.1	Requisitos generales.....	64
4.5.2	Pruebas y ensayos de tuberías	64
4.5.3	Pruebas hidrostáticas	65
4.5.4	Control dimensional	67
5.	Documentación	67
6.	Equipos.....	68
6.1	Lista de equipos	68
6.2	Especificaciones de los equipos	69

PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

1. Disposiciones generales pliego de condiciones generales

1.1 Objeto

El actual Pliego de Condiciones constituye el conjunto de instrucciones, normas, prescripciones y especificaciones que, junto con lo indicado en los documentos titulados Memoria, Planos y Presupuesto, definen todos los requerimientos que deben cumplimentar las obras de construcción de la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol.

Los documentos adjuntos contienen, además de la descripción general de las obras, las condiciones que han de cumplir los materiales y las instrucciones para la ejecución, medición y abono de las unidades de estas obras, siendo por consiguiente la norma guía que ha de respetar en todo momento por el Adjudicatario de la obra.

1.2 Concurso

Constituyen objeto de concurso restringido las empresas que la Propiedad juzgue oportuno invitar, el suministro de los equipos, materiales y servicios definidos en este Pliego de Condiciones y documentación complementaria. La Propiedad se reserva el derecho a la introducción de cambios de detalle o a exigir la prestación de servicios o suministros suplementarios que el Adjudicatario pueda prestar o realizar. Éste podrá motivar modificaciones de los requerimientos de suministro, siempre que sea técnica y económica aconsejable bajo su juicio por efecto de la utilización de patentes – o por otras razones-.

Las especificaciones y las descripciones del suministro no son limitativas, debiendo el Adjudicatario facilitar todos los datos e información que estime indispensables para conseguir plenamente los fines del contrato. El Adjudicatario dará preferencia a materiales y servicios de origen nacional siempre que se considere igualdad de condiciones.

Los Concursantes deberán presentar un Cuadro de Precios Unitarios, presupuestos parciales y global, una descripción de la organización de los trabajos en la que se encuentre incluida la relación de personal técnico que tendrá bajo su cargo a lo largo de la realización de las obras y una lista detallada de las máquinas y medios a utilizar con sus requerimientos y capacidades para cumplir los plazos establecidos. Asimismo, se incluirán las fechas límites en que se debe recibir de la Propiedad la información complementaria necesaria para poder desarrollar sus trabajos de acuerdo con el plan de obra previsto.

Se considerará como documento fundamental para la adjudicación del Concurso el Cuadro de Precios Unitarios presentado; los errores que se hayan podido cometer en la estimación de los presupuestos serán solventados por la Propiedad o su representante

legal, al estudiar las ofertas a partir de datos del citado cuadro y las mediciones del Anteproyecto. Los precios unitarios han de estar actualizados a la fecha de presentación de la oferta que se indica en la carta de invitación; las actualizaciones a fechas posteriores se harán siguiendo las directrices estipuladas en el ítem “Revisión de precios” del Pliego de Condiciones actual. En los precios unitarios deberá estar incluida la parte proporcional de los gastos generales, instalaciones, beneficios... y todos los posibles gastos directos o indirectos relacionados con ellos.

No se considerará válida ninguna oferta fuera del plazo marcado en la carta de invitación o en la que no estén incluidos todos los documentos que se señalen en el actual documento. La Propiedad pasará notificación del resultado del Concurso a los diferentes Concursantes; si los participantes no recibiesen esta comunicación en el plazo también señalado en la carta de invitación, pueden notificar a la propiedad su renuncia al Concurso.

La Propiedad comunicará al Adjudicatario la concesión de los trabajos objeto del concurso, donde la fecha de comienzo de los mismos figurará en el programa de trabajo; durante el periodo comprendido entre la adjudicación y la fecha de comienzo de los trabajos se cerrará el contrato formal entre el Adjudicatario y la Propiedad.

1.3 Contrato

El Adjudicatario estará obligado al cumplimiento de la reglamentación del trabajo correspondiente, la contratación del seguro pertinente, subsidio familiar, seguro de enfermedad y todos aquellos reglamentos de carácter social vigentes en el momento de la ejecución de las obras. Además, serán por cuenta del Adjudicatario los gastos fiscales y todo tipo de gastos involucrados en la formalización del contrato.

Cualquiera de las dos partes que intervienen en el contrato puede solicitar la transferencia a escritura pública del acuerdo de adjudicación, corriendo los gastos que origine dicha gestión a la parte peticionaria.

El Adjudicatario es el único responsable para la totalidad de servicios y suministro que se indican en el contrato en estricto cumplimiento de las disposiciones contractuales de las buenas normas de la técnica. Esta responsabilidad implica que bajo su cinturón caen las modificaciones, reparaciones y sustituciones indispensables para el exacto cumplimiento del contrato, así como las indemnizaciones justificadas por perjuicios causados por deficiencias, errores o atrasos laborales.

En caso necesario, la Propiedad podrá suspender los pagos al Adjudicatario y pedir indemnizaciones en base a lo formalizado en el contrato sin que esté sujeto a penalizaciones de rescisión. Las relaciones con el Adjudicatario serán establecidas a través de personas o entidades designadas por la Propiedad, que podrá verse representada por consultores u otras entidades que pueda elegir para colaborar en los estudios, fabricación, montaje y ensayos.

El representante del Adjudicatario será nombrado por éste de acuerdo con la Propiedad; durante el periodo de montaje esta persona estará presente y será la responsable del equipo de montaje. Asimismo, el Adjudicatario será representado en todas las reuniones convocadas (con un plazo no inferior a ocho días) por la Propiedad mediante la presencia de técnicos especializados en los puntos a tratar en dichas reuniones.

La lista de proveedores principales y empresas colaboradores del Adjudicatario, establecida en acuerdo común con la Propiedad, no podrá ser cambiada sin el visto bueno, dado por escrito, de esta última entidad. En todo caso, la aprobación por parte de la Propiedad no exime al Adjudicatario de su responsabilidad. El Adjudicatario no podrá ceder ni traspasar a terceros ninguna de sus obligaciones o derechos, ni utilizar en la ejecución de los trabajos otras empresas o sociedades que las que figuran en el contrato como aceptadas por la Propiedad. En todos los casos, el Adjudicatario es plenamente responsable del contrato ante la Propiedad, personal obrero y terceros.

Si el Adjudicatario, sin autorización escrita previa por parte de la Propiedad, cediese o traspasase a terceros cualquiera de sus obligaciones o derechos estipulados en el convenio, o emplease en la ejecución de las obras otra empresa que no estuviese previamente aceptada, la Propiedad aplicará las sanciones que estime oportunas, pudiendo llegar a la rescisión del contrato en cuyo supuesto se aplicará todo lo estipulado en el ítem “Rescisión del contrato”.

La Propiedad puede indicar en la carta de invitación al concurso la fianza inicial y retenciones de garantía que se descontarán de las certificaciones. Estas cantidades retenidas por la Propiedad resultan en caso de rescisión o abandono del trabajo por causas imputables al Adjudicatario, que responde de todos los medios auxiliares, maquinaria y materiales que tenga depositados en la obra, los cuales no podrán ser retirados de la misma sin autorización escrita de la Propiedad.

El Adjudicatario es el único responsable de la ejecución técnica adecuada de las obras, no teniendo derecho a indemnización alguna por el mayor precio a que pudiesen resultar, ni por las falsas operaciones que cometa durante la construcción de las mismas, ni por las modificaciones que la Dirección Facultativa tenga a bien marcar, corriendo dichas operaciones por su cuenta y riesgo, independientemente de las inspecciones ejercidas por la Dirección Técnica.

1.4 Programa

El programa general de los trabajos (estudios, aprovisionamiento, fabricación, transporte, montaje y ensayos) a presentar con la propuesta deberá seguir las directrices recogidas en estas normas e información complementaria facilitada.

El programa deberá ser desarrollado según las condiciones especificadas en estas normas – en otro detalle- en el que se indicarán las fechas de conclusión de cada uno de los trabajos señalados en el trabajo inicial, así como las fechas intermedias cuyo

incumplimiento auspicio penalizaciones. El plazo de presentación de este programa detallado será de treinta (30) días a partir de la fecha de adjudicación.

Este programa deberá indicar las fechas límite en que se consideren indispensables los suministros para asegurar la continuidad de los trabajos, así como los datos referentes a la posibilidad del inicio de trabajos de terceros. La determinación del orden de las obras está bajo la potestad del Adjudicatario (salvo en los casos en los que el Ingeniero Director considere conveniente la modificación).

Todos los trabajos se ejecutarán en estricto seguimiento del Proyecto que ha servido de base, de las modificaciones que sobre el mismo hayan sido aprobadas y a las órdenes e instrucciones que entregue el Ingeniero Director al Adjudicatario, siempre que se encaje dentro de la cifra a que responden los Presupuestos. El contrato no podrá ser alterado sin la conformidad expresa de la Propiedad; además, cuando ésta proponga una alteración de dicho programa, el Adjudicatario ha de mover los hilos para seguir estas directrices.

El Adjudicatario dará comienzo a las obras en el plazo marcado, desarrollándolas en la forma necesaria para que la ejecución total se lleve a cabo dentro del plazo exigido en el contrato; éste ha de mantener informado por escrito al Ingeniero Director acerca de las obras, poniéndose con él en contacto antes de veinticuatro (24) horas desde su iniciación.

En el supuesto de que los trabajos se realicen con retraso con respecto al programa aprobado recogido en el contrato, se aplicarán, como ya se ha indicado, las penalizaciones correspondientes. Si dicha demora no es imputable al Adjudicatario, éste puede solicitar a la Propiedad una prórroga del plazo de ejecución que será igual al tiempo perdido.

La petición de este tiempo extra debe tener lugar en el periodo de un mes desde el día que se da la causa originaria del retraso, alegando las razones por las que estime no serle imputable la demora y señalando el tiempo probable de su duración. En caso de que el Adjudicatario no solicitase este aplazamiento, se entenderá que renuncia a su derecho y que, a efectos de la aplicación del contrato, los retrasos que se produzcan en relación con lo establecido en el contrato son responsabilidad suya.

El Adjudicatario se someterá a las Leyes, Reglamentos y Ordenanzas vigentes en el momento de realización de la obra, así como los que se dicten durante su ejecución, quedando asimismo obligado a la cumplimentación de la legislación vigente en lo tocante a los accidentes de trabajo desde que asume la responsabilidad de los trabajos contratados.

1.5 Estudios y documentación técnica

Acusando recibo de encargo, el Adjudicatario reconoce haber recibido de la Propiedad todos los datos y documentos de base necesarios para los estudios y proyectos. En caso

de errores u omisiones, el Adjudicatario deberá proponer las modificaciones que estime oportunas para una buena ejecución del mismo; también deberá solicitar con antelación suficiente todas las informaciones de detalle indispensables para la buena ejecución del suministro.

Los documentos del contrato y todos aquellos que la propiedad entregue durante la ejecución del contrato deben ser estudiados minuciosamente por el Adjudicatario. En caso de errores u omisiones, éste debe motivar los cambios que estime convenientes para la buena organización del suministro.

El Adjudicatario proporcionará en la fecha establecida en el calendario general de ejecución de las obras con los datos y condiciones indicados en las normas y demás documentos que le encargue la Propiedad: memoria, cálculos justificativos, características de los materiales, especificaciones relativas a los mismos, planos y demás documentación técnica complementaria a la incluida en la oferta presentada, lo que permitirá a la Propiedad:

- Tener total consciencia del estado de tensiones al que estará sometido el equipo de diseño en las diferentes hipótesis de cálculo, garantías que ofrecen los materiales, soldaduras y demás elementos incluidos en el suministro, así como de su funcionamiento, conservación y explotación.
- Efectuar la inspección de su fabricación y montaje.
- Estudiar y proyectar todos los trabajos afines que no incumben al Adjudicatario.

Todos los documentos facilitados por el Adjudicatario, así como leyendas y acotaciones, deberán estar redactados en el idioma que corresponda, castellano en este caso. La Propiedad podría aceptar documentos escritos en inglés, reservándose el derecho a exigir traducciones al castellano.

La Propiedad comunicará al Adjudicatario, en el plazo que señala en el programa general de trabajos, la aprobación o reparos a los documentos ya referidos en párrafos anteriores, que conforman la total definición del equipo y servicios contratados, entendiéndose que estos están aceptados si en dicho plazo no se indicase lo contrario. Los documentos sobre los que la Propiedad sí efectúe observaciones antes de la fecha concertada serán revisados por el Adjudicatario y nuevamente sometidos a aprobación dentro del plazo establecido en el calendario general de las obras. Si la Propiedad no pudiese admitirlos, convocaría una reunión para su discusión y resolución en el plazo de ocho días.

El Adjudicatario remitirá a la Propiedad en el plazo de quince días desde su aprobación los ejemplares indicados en estas normas de cada uno de los documentos aceptados. Para que no haya problemas ni malentendidos, realizará esta acción al menos cinco (5) veces. Los documentos aprobados no podrán ser modificados sin previa autorización

escrita de la Propiedad; no obstante, este visto bueno no exime la responsabilidad del Adjudicatario.

Todos los documentos escritos y gráficos recibidos por la Propiedad como parte del suministro serán tratados por ésta a todos los efectos como de su Propiedad. De igual modo, toda la documentación y dibujos serán enviados por la Propiedad al Adjudicatario para la ejecución del suministro, no pudiendo este último comunicar a terceros o publicar sus reproducciones sin previa autorización de la propiedad. El Adjudicatario se encargará de entregar como mínimo tres (3) copias de los manuales de instrucciones de los equipos suministrados, cuyo contenido mínimo será el siguiente:

- Descripción
- Características nominales de diseño y testeo.
- Composición y características de los materiales.
- Principios de operación.
- Instrucciones de operación.
- Gradientes máximos y limitaciones en condiciones distintas a las nominales. Puntos de tarado.
- Lista de componentes con números de identificación, dibujos de referencia, nombres y características de la pieza (dimensiones, materiales...)
- Instrucciones de recepción, almacenamiento, manejo y desembalaje del equipo.
- Instrucciones de montaje, desmontaje y holguras.
- Instrucciones de mantenimiento.
- Lista de repuestos.
- Pruebas y controles periódicos.

1.6 Pliegos, Instrucciones y Normas aplicables

Las prescripciones de las instrucciones y normas que se muestran a continuación serán de aplicación con carácter general para los materiales y la ejecución de las obras, en todo aquello que no suponga un obstáculo a las indicaciones implicadas en el Pliego de Condiciones:

- Artículos 1588-1600 del Código Civil en los casos en los que sea procedente su aplicación.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (R.D. 842/2002).
- Reglamento de Redes y Acometidas de Combustibles Gaseoso (O.M. 18/11/74).
- Reglamento de equipos a presión y sus ITC (R.D. 2060/2008).
- Instrucción de hormigón estructural (R.D. 1247/2008) con nulidad de los párrafos 7 y 8 del artículo 81 y el anejo 19 de la instrucción, por Sentencia del Tribunal Supremo de 27 de septiembre de 2012.
- Instrucción para la recepción de cementos (R.D. 256/2016).
- Código Técnico de la Edificación (R.D. 314/2006).

- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las tuberías de abastecimiento de agua (O.M. 22/08/63).
- Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias (R.D. 379/2001) con modificación de los artículos 1-3 y 6.2, la disposición final 1 y las Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ-1 – APQ-7 y añadiendo la MIE APQ-9, por el Real Decreto 105/2010 y la MIE APQ-8 por Real Decreto 2016/2004.
- Norma de construcción sismorresistente (R.D. 997/2002).
- Cuantos preceptos sobre Seguridad e Higiene en el Trabajo contengan las Ordenanzas Laborales, Reglamentos de Trabajo, Convenios Colectivos y Reglamentos de Régimen Interior en vigor.

1.7 Seguridad y accidentes de trabajo

El Adjudicatario queda obligado al cumplimiento de la normativa referente al Estudio de Seguridad e Higiene en el trabajo vigente. Todos cuantos aparatos, maquinaria, herramientas y medios auxiliares a utilizar por el Adjudicatario deben reunir las máximas condiciones de seguridad y resistencia, así como cumplir todas las normas oficiales dictadas al efecto. Asimismo, el personal del Adjudicatario está obligado a emplear todos los dispositivos y medios de protección personales necesarios para reducir los riesgos profesionales, pudiendo el Ingeniero Director suspender los trabajos si estima que el personal está expuesto a peligros de difícil corrección.

Éste podrá obligar por escrito al Adjudicatario al cese de la obra de cualquier trabajador que, por imprudencia temeraria, pudiere provocar accidentes que hiciesen peligrar su integridad física o la del resto de compañeros. Toda la responsabilidad en los accidentes que pudiesen ocurrir por el empleo de materiales defectuosas, por imprudencias o por el incumplimiento de lo anteriormente mencionado, recaerá únicamente sobre el Adjudicatario. Correrán también a su cuenta las multas en las que incurra por violar las disposiciones oficiales, así como los desperfectos y daños ocasionados a terceros en su persona, bienes o haciendas.

El Adjudicatario queda en libertad de ejecutar los andamiajes que estime convenientes, siempre dentro de las normas de seguridad para el personal que señale en cada instante los Reglamentos de seguridad e higiene y/o accidentes de trabajo. Del mismo modo, el Ingeniero Director podrá obligar al Adjudicatario en cualquier momento, antes o después del comienzo de los trabajos, que presente los documentos que acrediten el haber formalizado los regímenes de la Seguridad Social en la forma legal vigente.

2. Calidad de los materiales

2.1 Materiales en general

Todos los materiales proporcionados por el Adjudicatario aparezcan o no en los documentos del presente Proyecto deben reunir las condiciones de calidad exigibles en la buena praxis de la construcción. La aceptación de una marca comercial por parte de la Propiedad no exime al Adjudicatario del cumplimiento de estas prescripciones.

Deben presentarse previamente muestras para su aprobación y reconocimiento por parte del Ingeniero Directo -o en su defecto por el Subdirector de la obra- sin cuyo permiso no se podrá proceder a la utilización, pudiendo obligar a la retirada del material no aprobado. Además, los materiales rechazados deberán ser inmediatamente retirados de la obra por cuenta y riesgo del Adjudicatario y depositados en los lugares indicados por la Dirección de la Obra. En este caso, la Propiedad dará orden al Adjudicatario para que a su costo se reemplacen por otros que satisfagan los requerimientos estipulados por el Pliego de Condiciones.

El Adjudicatario, a su costo, transportará y colocará los materiales no utilizables agrupándolos ordenadamente y en el lugar de la obra que se designe, para evitar así que supongan un perjuicio en el desarrollo de la obra. Los materiales procedentes de las excavaciones, derribos, etc... que no sean utilizables se retirarán de la obra. Si a pesar de estas medidas preventivas fuesen advertidas fallas en un material aprobado, dicho material podría ser retirado a cuenta del Adjudicatario aunque ya esté colocado.

2.2 Aceros

El Adjudicatario indicará las características mecánicas de los aceros empleados con arreglo a los siguientes elementos:

- Piezas de acero moldeado (*casting*).
- Estructuras de acero.

2.3 Resto de los materiales utilizados

Para el restante de los materiales de construcción usados en la fabricación se indicarán las características mecánicas, así como su composición química.

3. Normas de cálculo

Serán de aplicación las normas DIN u otras de rango idéntico vigentes sobre las bases de cálculo para construcciones hidráulicas de acero. El Adjudicatario indicará las tensiones de trabajo, simples y compuestas a que quedan sometidas los diferentes materiales que conforman las estructuras. Asimismo, se señalarán las tensiones máximas permisibles para el cálculo (tracción-compresión previa comprobación del pandeo, esfuerzos cortantes y tensiones de comparación).

La tensión máxima admisible (indicada como S en el Anexo II. Cálculos Justificativos) es un límite absoluto que no puede ser sobrepasado ni siquiera en el caso fatal de piezas

sometidas a choques, esfuerzos dinámicos, fatigas locales, vibraciones y oxidaciones. Se indicarán asimismo las cargas máximas transmitidas al hormigón por las piezas fijas, así como las correspondientes a los órganos de maniobra.

Los esfuerzos de compresión en el hormigón se atenderán a lo especificado en las normas DIN y no superarán en ningún caso la carga de rotura indicada en la norma EH vigente. Las conducciones blindadas y los revestimientos se dimensionarán para los estados de carga más desfavorables, sin tener en cuenta la contribución del hormigón que las engloba. El Adjudicatario facilitará los cálculos completos de los elementos importantes del suministro e indicará los coeficientes de seguridad de elementos tales como cilindros y vástagos de servomotores, cadenas, cables, etc...

4. Disposiciones generales de las obras

4.1 Replanteo de la obra

El Ingeniero Director, una vez que el Adjudicatario esté en posesión del Proyecto y antes de comenzar las obras, deberá realizar el replanteo de las mismas, con especial atención en los puntos importantes. Se levantará -por duplicado- un Acta de Replanteo firmada por él mismo y el representante del Adjudicatario.

Todas las operaciones que se necesitan para el replanteo serán efectuadas por y a cuenta del Adjudicatario, no teniendo por este concepto derecho a reclamación de ninguna clase. Asimismo, está obligado a suministrar a su cargo a la Propiedad los medios y aparatos que la dirección de obra estime necesarios para llevar a cabo los replanteos de cualquier tipo.

4.2 Plazo de ejecución

Los plazos de ejecución señalados en el contrato empezarán a contar a partir de la fecha de replanteo de las obras o desde la notificación por parte de la Propiedad para autorizar el comienzo de las mismas. El Adjudicatario está obligado a cumplir estos plazos, que serán improrrogables. Sin embargo, pueden estar sujetos a prórrogas cuando las modificaciones solicitadas por el Ingeniero Director y debidamente aprobados por la Propiedad influyan de manera sustancial en los plazos señalados en el contrato.

Si por causas ajenas por completo al Adjudicatario no fuese posible comenzar los trabajos en la fecha prevista o tuviesen que ser suspendidos una vez iniciados, el Ingeniero Director concederá el tiempo extra ya estipulado en el apartado 1.4 Programa.

4.3 Mano de obra

El personal que tenga el Adjudicatario realizando operaciones de obra (encargado, capataz, oficial, ayudante o peón) debe ser cualificado y responsable, al igual que todo el personal dependiente de los sub-Adjudicatarios, que en todo momento acatarán las directrices de la Dirección de la obra. El Adjudicatario está obligado a tener siempre en la obra el número de operarios proporcionado a la extensión y clase de trabajos que se esté ejecutando.

Estos operarios serán de aptitud reconocida en su respectivo oficio, y habitualmente ha de haber en el escenario una persona encargada del conjunto. No se permitirá trabajar a ningún obrero que no se encuentre debidamente capacitado o en quien se detecte una más que evidente falta de costumbre a la hora de trabajar sobre andamios; si por omisión o falta de observación de las precauciones ocurriese una desgracia, serán de cuenta y riesgo del Adjudicatario las responsabilidades que tuviesen lugar.

La Dirección de la Obra podrá prohibir la permanencia en la obra de personal del Adjudicatario por motivo de falta de respeto o a causa de actos que perturben la marcha de la obra; esta decisión se puede recurrir por parte del Adjudicatario si se entendiese que no hay motivo fundado para dicha prohibición. El personal empleado en la ejecución de las obras debe estar adecuadamente afiliado al régimen correspondiente de la Seguridad Social, siendo obligado a aportar a la oficina de obra los justificantes correspondientes. Además, el Adjudicatario está obligado al cumplimiento de lo establecido en la Ley sobre Contrato de Trabajo y en las Reglamentaciones de Trabajo vigentes o que se dicten durante la realización de las obras.

El Adjudicatario habilitará en la obra una oficina en la que tendrá siempre una copia de todos los documentos del Proyecto que le hayan sido facilitados por el Ingeniero Director, así como los restantes documentos, equipos y materiales que se estipulen. El adjudicatario podrá sacar a sus expensas copias de los documentos del Proyecto de Contrata, cuyos originales le serán facilitados por el Ingeniero Director, quien autorizará con su firma las copias, si el primero lo deseara.

El Adjudicatario, en su representación o por medio de sus facultativos, representantes o encargado, estará en la obra durante la jornada legal de trabajo, de ocho (8) horas y acompañará al Ingeniero Director, o a las personas que éste delegue, en las visitas que hagan a la obra, poniéndose a su disposición para la práctica de los reconocimientos que se consideren oportunos, facilitando los datos necesarios y los medios para la ejecución y aprobación de mediciones, comprobaciones y liquidaciones.

El Adjudicatario -o su delegado- vigilarán los trabajos de colocación del andamiaje, cimbras y demás equipamiento auxiliar. Comprobará que los materiales llevan garantía de fabricación, siendo el Adjudicatario el responsable de los accidentes que ocurran por incumplimiento de esta disposición o por no tomar las debidas precauciones. Antes del inicio de las obras se procederá al replanteo general de las mismas en colaboración con el Director y el Subdirector de Obra, realizándose la correspondiente Acta de Replanteo, que quedará plasmada en el Libro de Órdenes, considerándose la nueva fecha estipulada como la de inicio de las obras.

Todas las operaciones y medios auxiliares necesarias para el replanteo serán de exclusiva cuenta del Adjudicatario, pudiendo ser vigilados y anulados por la Dirección Técnica. Éste no podrá reclamar indemnización alguna por sustracción, pérdida u otros perjuicios acaecidos durante la realización de la obra; del mismo modo, será responsable

de las pérdidas de material que se entregase a su custodia, descontándosele el importe de las cantidades a percibir. Igualmente responderá ante cualquier daño causado en las propiedades colindantes, estando obligado a dejarlas en su estado original.

4.4 Mejoras y variaciones en el proyecto

Si durante el transcurso de las obras el Ingeniero Directo estimase conveniente introducir modificaciones en el Proyecto, el Adjudicatario estará obligado a ejecutarlas siempre y cuando la cantidad de las nuevas obras no creciese ni decreciese. No se considerarán variaciones del Proyecto firmado que no hayan sido propuestas por escrito por el Ingeniero Director.

Si antes del inicio de las obras o en el transcurso de éstas la Propiedad, en acuerdo con el Ingeniero Director, acordase introducir en el Proyecto modificaciones que supongan aumento y/o reducción de las cantidades especificadas en el Presupuesto, serán obligatorias para el Adjudicatario estas nuevas disposiciones sin que tenga derecho a indemnización alguna con el pretexto de pretendidos beneficios que se hubieran podido derivar de la parte reducida, incluso en hipótesis de suspensión de los trabajos. Aun cuando las reformas modificasen el trazado original, si se le presentan al Adjudicatario con la suficiente previsión, no podrá reclamar compensación económica alguna.

En el caso de darse alguna modificación en el Proyecto, lógicamente el Adjudicatario tendrá derecho a que se prorrogue el tiempo que el Ingeniero Directo estime oportuno; cuando se introducen este tipo de variaciones se hará constar por escrito, antes de comenzar las obras, el importe estipulado para las mismas si no tuviesen precio estimado en el Presupuesto, cuyo valor se abonará en la liquidación correspondiente al plazo en el que el trabajo se haya realizado.

4.5 Contradicciones, omisiones o errores en los documentos

En caso de contradicción entre el Pliego de Condiciones y los Planos prevalecerá lo escrito en el primero. Lo mencionado en el Pliego y omitido en los documentos gráficos, o viceversa, ha de ser aceptado como si se incluyese en ambos documentos siempre que, a juicio del Ingeniero Director, quede definida convenientemente la unidad de obra correspondiente con su presupuestación correspondiente.

Los diferentes apartados del Pliego de Condiciones son complementarios entre sí, entendiéndose por tanto que las prescripciones que contenga uno de ellos afecte al resto. Las contradicciones o dudas entre sus especificaciones se resolverán por la interpretación que realice a buen juicio el Ingeniero Director. En todo caso, las contradicciones, omisiones o errores que se adviertan en estos documentos deberán reflejarse de manera preceptiva en el Acta de Replanteo.

4.6 Trabajos defectuosos o no autorizados

El Adjudicatario deberá emplear materiales de construcción que cumplan las condiciones exigidas en el Pliego de Condiciones Particulares (documento que va a

continuación del presente Pliego de Condiciones Generales) y desempeñar todos los trabajos contratados de acuerdo con dicho documento.

En base a lo anterior, cuando el Ingeniero Director o su representante en la Obra advierta defectos en los trabajos efectuados, o que los materiales empleados o los aparatos colocados no reúnan las condiciones preceptivas, podrá disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas según el contrato, a expensas del Adjudicatario. Si éste no considerase justa la decisión y se negase a la demolición y posterior reconstrucción se procederá del siguiente modo:

- Cuando los materiales no reúnan la calidad requerida o no estuviesen perfectamente preparados, el Ingeniero Director dará orden al Adjudicatario para que se reemplacen por otros que se ajusten a las condiciones requeridas por los Pliegos de Condiciones. A falta de éstos, se responderá a las órdenes del Ingeniero Director.
- Este podrá permitir el empleo de materiales de mayor calidad a la fijada de antemano en caso de que el Adjudicatario no pueda suministrarlos, descontándosele en este caso la diferencia de precio del material requerido al defectuoso empleado, y no teniendo derecho el Adjudicatario a indemnización alguna en el segundo caso.

El Adjudicatario es el único responsable de la ejecución de los trabajos para los que ha sido contratado y de las faltas y defectos que éstos pudiesen tener por su incorrecta ejecución y por la deficiencia de la calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servir de excusa ni le otorgue derecho alguno el que el Ingeniero Director o sus subalternos no le hayan llamado la atención sobre el particular, ni tampoco el hecho de que hayan sido valoradas en las certificaciones y participaciones de las obras.

4.7 Suspensión de las obras

Cuando la Propiedad desee suspender la realización de las obras deberá avisar al Adjudicatario con un mes de antelación, teniendo este último que suspender los trabajos sin derecho a indemnizaciones, siempre que se le abone el importe de la obra ejecutada en la liquidación correspondiente y el valor de los materiales adquiridos hasta ese momento. Se seguirá el mismo procedimiento para el caso de rescisión coherente.

Si la suspensión de las obras fuese motivada por el Adjudicatario, la Propiedad se reserva el derecho a la rescisión del contrato, abonando al primero de ellos únicamente la obra ejecutada con pérdidas de la garantía como compensación a la Propiedad por los perjuicios generados. En caso de muerte o quiebra del Adjudicatario el contrato queda rescindido, a no ser que los herederos de la quiebra ofrezcan realizarla siguiendo las directrices formalizadas en el primero de los contratos. La Propiedad está en su derecho de aceptar o rechazar la oferta sin que los síndicos tengan derecho a indemnización económica alguna.

Tanto en los supuestos de rescisión como en los que legalmente se pudieran presentar, las herramientas y demás elementos de trabajo que sean de pertenencia del Adjudicatario tendrán que ser recogidas en un plazo de una semana, entendiéndose que los abandona a favor de la obra de no proceder de este modo.

En el contexto del Pliego de Condiciones Generales actual, se consideran causas de rescisión de la obra las siguientes:

- La no ejecución de las obras en base a lo formalizado en el Proyecto.
- El empleo deficiente de los materiales o su mala colocación que obliguen a auditarla como defectuosa.
- El no cumplimiento de los plazos establecidos.
- La incapacidad del personal contratado.
- La quiebra o suspensión de pagos por parte del Adjudicatario.
- La suspensión de la obra comenzada siempre que el pago exceda a seis (6) meses.
- El no comenzar los trabajos en el plazo señalado en el contrato.
- El incumplimiento de las condiciones del contrato.
- La terminación del plazo de ejecución de los trabajos sin haber llegado a concluirlos.
- El abandono de la obra sin causa justificada.
- La muerte o incapacitación laboral del Adjudicatario.
- Alteraciones del contrato de forma que suponga modificaciones del proyecto o de las unidades de obra en un 25% como mínimo del importe de aquel y en un 50% de las unidades modificadas.
- La suspensión de la obra comenzada dentro del plazo de tres meses a partir de la adjudicación.
- Toda causa de fuerza mayor que obligue a suspender las obras de manera indefinida.

Excepto en los últimos cuatro casos, la fianza quedará en beneficio de la Propiedad; en todos los casos ésta se reserva el derecho a continuar las obras, bien por sí misma, bien por las personas o entidad que estime oportuna.

4.8 Seguros

El Adjudicatario se ve obligado, después de la verificación del replanteo y antes del comienzo de la obra, a facilitar a la Dirección la documentación que acredite haber suscrito las siguientes pólizas de seguro, en adición a las correspondientes afiliaciones a la Seguridad Social:

- Seguro contra daños a terceros que deriven de la ejecución del Proyecto.
- Seguro de accidentes de trabajo en la Mutualidad Laboral que aplique.
- Seguro de automóviles para todos aquellos vehículos del Adjudicatario que tengan acceso a la zona de obras.

- Seguro para toda la maquinaria y el equipo que el Adjudicatario emplee en el trabajo.
- Seguro de incendios para las obras, en compañías solventes inscritas en el Ministerio de Hacienda en virtud de la Ley de Seguros vigente.

5. Ensayos, pruebas y protecciones

5.1 Ensayos en taller

Todas las uniones soldadas serán inspeccionadas mediante control radioscópico de las soldaduras, que se realizarán en presencia de representantes de la Propiedad y del Adjudicatario teniendo en cuenta los plazos fijados. Se ensayarán mecánicamente varias probetas de soldadura realizadas con materiales y operarios que hayan de intervenir en la obra.

Para el caso de los tanques de almacenamiento se inspeccionarán el 10% de los cordones según la norma ASME sección VIII. Para intercambiadores de calor y en todos los depósitos a presión se realizarán pruebas de ventosa en las uniones soldadas. Los cilindros de los servomotores y demás órganos que contengan aceite a presión (cuerpos de las bombas de aceite y sus correspondientes válvulas) serán sometidos en taller a una presión de ensayo igual a la de servicio, aumentada en un 50%. Los esfuerzos durante el ensayo no deberán superar el 40% de la carga de rotura ni el 80% del límite elástico en ningún caso. Además, durante dicho ensayo no deben producirse deformaciones apreciables ni fugas de filtración alguna.

Para los grupos de motobombas se realizarán todas las pruebas necesarias según normas para determinar las curvas características. Para el trazado de las curvas de altura manométrica, potencia y rendimiento, se considerarán al menos cinco puntos, desde el caudal cero al caudal máximo nominal.

5.2 Presentación en taller

Con el propósito de pronosticar potenciales dificultades que pudiesen presentarse en el montaje definitivo de los elementos objeto de suministro, la Propiedad puede exigir que se realice en taller una presentación completa de estos elementos para comprobar cotas, planicidad...

El Adjudicatario indicará de manera clara en su oferta la repercusión económico-financiera que represente la realización de estos trabajos de presentación en taller del suministro contratado.

5.3 Protección contra la corrosión

El Adjudicatario deberá proponer la protección más recomendable en base a su experiencia para la aprobación por parte de la Propiedad. Deberá aplicarse de manera general a todas las superficies de los elementos fabricados con materiales oxidables en contacto con el agua y la intemperie, comprendiendo limpieza de chorro de arena y metalización de Zn según las normas AENOR A 91-202 con una capa de zinc de 12

centésimas de milímetro (0.12 mm) de espesor, seguida como mínimo de tres capas de pintura de características convenientemente justificadas.

Sin embargo, la Propiedad se reserva del derecho a ejecutar total o parcialmente la protección contra la corrosión de todo o parte del suministro, por cuyo motivo el Adjudicatario detallará en el Presupuesto el importe de estas operaciones, que podrán ser deducidas del costo total en el caso de que la Propiedad las realice por su cuenta.

Las partes del suministro que estén mecanizadas serán desengrasadas y se protegerán con una pintura vinílica incolora arrancable. El tiempo transcurrido desde el tratamiento de la superficie metálica y la aplicación de la pintura no podrá ser superior a veinticuatro (24) horas. El sistema de protección con pinturas de las diferentes superficies de metal deberá responder a las condiciones ambientales de la zona geográfica del almacenamiento y a la naturaleza de los productos manejados y condiciones de funcionamiento.

5.3.1 Intercambiadores de calor

Las superficies de los intercambiadores serán tratadas según métodos adecuados a cada sistema de pintura. Las superficies metálicas serán limpiadas antes de la aplicación de pinturas de acuerdo con las especificaciones de la NACE (*National Corrosion Engineers*) y con los estándares radiográficos del comité de corrosión de la Real Academia de la Ciencia Técnica de Suecia (*Kungliga Vetenskapsakademien* SIS 05.59.00).

Aquellos elementos metálicos complementarios en los que por razones específicas no se pueda aplicar el método de chorreo se limpiarán mediante cepillado (grado St. 2).

La preparación de superficies de acero al carbono se realizará siguiendo las especificaciones SIS 05.59.00 y PSC-SP. Si no se especifica lo contrario se aplicará un chorreado abrasivo a metal blanco SIS Sa 2^{0.5} (perfil de rugosidad 25/40) según lo estipulado en la especificación SSPC-SP 10. Las superficies externas mecanizadas de este material se protegerán mediante un inhibidor de corrosión, eliminable con agua o disolventes orgánicos comunes, que ha de ser aprobado por el comprador. En aquellas superficies en las que exista algún recubrimiento se tendrá en cuenta la norma VDI 2532.

Las pinturas se aplicarán con pistola mediante sistema de pulverización a presión sin aire y cuando se den las condiciones ambientales adecuadas. La protección mediante estas pinturas se realizará aplicando varias capas:

- Capa de imprimación de cromato amarillo de 65 micras de espesor (referido a película seca).
- Capa de imprimación de epoxi-cromato de zinc especial de 80 micras de espesor (referido a película seca).
- Dos capas de esmalte de poliuretano alifático de treinta y cinco (35) micras por capa.

Las estructuras metálicas y soportes complementarios se tratarán de manera diferente, según lo especificado a continuación:

- Un chorreado Sa 2^{0.5}.
- Primera capa de imprimación (Zn inorgánico) de 65 micras de espesor (referido a película seca).
- Segunda capa de resina de 80 micras (referido a película seca)
- Pintura de acabado consistente en dos capas de esmalte de poliuretano alifático de 35 micras de espesor (referido a película seca).

5.3.2 Tuberías

Todas las tuberías han de ser tratadas con un chorreado previo Sa 2^{0.5} según las normas de la Real Academia de la Ciencia Técnica de Suecia. El chorreado deberá realizarse con preferencia en taller para evitar la acumulación de polvo, salvo causa justificada. Las pinturas a aplicar en las tuberías son:

- Capa de imprimación de 40 micras de espesor de mínimo a clorocaucho.
- Capa de pintura de fondo de 80 micras de espesor de clorocaucho.
- Dos capas de acabado de 25 micras por capa de clorocaucho puro.

5.3.3 Columnas y depósitos a presión

Todas las columnas de la instalación de acero al carbono han de ser tratadas según el chorreado SIS 05.59.00 de la Real Academia de las Ciencia Técnica de Suecia. Tras el tratamiento superficial se aplicarán las siguientes capas de pintura:

- Capa de 25 micras de espesor de pintura epoxi.
- Capa de 25 micras de espesor de pintura en fase epoxi.
- Dos capas de 40 micras de espesor por capa de pintura epoxi.

5.3.4 Bombas

Los tratamientos y acabados superficiales de las bombas dependerán de la atmósfera circundante de la instalación. La limpieza de las superficies se realizará siguiendo alguno de los procedimientos que se enumeran a continuación; la selección de uno u otro dependerá de las recomendaciones del proveedor:

- Granallado metálico a basa de granalla de material no contaminante de la superficie (según norma SIS 05.59.00).
- Chorreado de arena de sílice por aire comprimido contra la superficie.
- Decapado químico eliminado la capa de óxido y otras impurezas por inmersión en solución ácida.

La superficie se preparará con una capa de Wash Primer para incrementar la adherencia. Una vez pretratada, se aplican las siguientes capas de pintura:

- Capa de 75 micras de espesor de pintura de imprimación epoxi.
- Capa de 75 micras de espesor de pintura de acabado epoxi.

- Dos capas de 45 micras de esmalte sintético.

6. Fabricación, montaje, recepción y garantías

6.1 Inspección fabril

La Propiedad se guarda el derecho a realizar de manera directa (o siendo representada por una entidad de su elección) la inspección de la fabricación de los equipos en relación a la cumplimentación de los plazos, a la calidad de los materiales y a las técnicas empleadas, tanto en las fábricas o instalaciones del Adjudicatario como en las de sus suministradores.

A efectos de esta cláusula aquí introducida, el Adjudicatario se ve obligado a asegurar en cualquier momento a la Propiedad el libre acceso a las fábricas o instalaciones así como proporcionar todas las facilidades para que éstos puedan llevar a cabo sin mayor problema su propósito. El Adjudicatario deberá informar a la Propiedad, con la suficiente antelación, de la fecha fijada para la realización de los ensayos previstos y de la recepción de materias primas, así como de la ejecución de las operaciones más importantes en fabricación o montaje. Independientemente de la presencia o no de la Propiedad, el Adjudicatario deberá proporcionarles por escrito memorias de los ensayos realizados, al menos tres copias.

6.2 Montaje e inspección

Se deberán presentar para su aprobación una relación del personal técnico que se ocupará de los montajes, indicando las funciones a realizar por cada uno de ellos y acreditando su capacidad técnica para el desarrollo de los mismos. En el supuesto de que bajo la consideración de la Propiedad el personal técnico seleccionado por el Adjudicatario sea insuficiente, éste se verá obligado a completar el roster con el número de personal estipulado.

La Propiedad se reserva el derecho a recurrar tanto al representante del Adjudicatario como a cualquier otro miembro de su organización en la obra y obligar a éste a cambiarlo en un plazo de un (1) mes por otro de igual categoría, en caso de no verse satisfechos por la realización del montaje.

El Adjudicatario podrá cubrir con compañías de seguros los riesgos relativos a los materiales y equipos en curso de montaje. Este seguro será ampliado para cubrir además los daños que cause a la Propiedad o a terceros durante o por causa de las operaciones de montaje. Asimismo, ésta puede indicar la obligatoriedad del seguro de materiales y equipos en curso de montaje; un seguro que puede ser ampliado para cubrir además los daños que cause a la Propiedad o a terceros por causa de las operaciones de montaje.

El personal de inspección de la Propiedad podrá ordenar la suspensión de los trabajos que no estén siendo ejecutados según las especificaciones contractuales, siendo confirmada la orden de suspensión por escrito. Siempre que fuese necesario enviar una

pieza o equipo a fábrica como consecuencia de un error o avería, todos los gastos vinculados correrán por cuenta del Adjudicatario. La Propiedad fiscalizará directamente a través de sus representantes las labores de montaje; a este efecto estará asegurado al personal de inspección el libre acceso a cualquier hora a las oficinas de obra del Adjudicatario que se ve en la obligación de facilitar cuantos datos y aclaraciones sean precisos.

6.3 Controles

El Adjudicatario se asegurará (por controles adecuados) de la buena calidad del material entregado. Los resultados de los ensayos serán sometidos a la aprobación de la Propiedad, quien podrá exigir si lo estima conveniente nuevos controles suplementarios.

6.3.1 Intercambiadores de calor

Antes de iniciar la fabricación de los intercambiadores de calor, el proveedor someterá a la aprobación de la Propiedad los procedimientos de soldadura (WPS) que se emplearán, debidamente respaldados por sus correspondientes certificados de calificación (PQR) emitidos por una Entidad Colaboradora de la Administración (ENICRE), así como los certificados de homologación de los soldadores que han de participar en la fabricación. Entre otros controles, serán obligatorios los siguientes:

- Examen visual del aspecto general, esperando no detectar defectos de fabricación o de transporte.
- Ensayos de pruebas o presentación de documentos acreditativos, según las normas correspondientes.

6.3.2 Tuberías

Las tuberías se deben manipular sin movimientos ni golpes bruscos, evitando en la medida de lo posible el arrastre del material por el terreno. Serán obligatorias las siguientes pruebas:

- Inspección visual del aspecto general sin que se detecten defectos de fabricación o transporte.
- Recopilación de copia de solicitud y aceptación del suministro del material por el Adjudicatario y el Proveedor con el albarán de recepción. Se incluirá además el Certificado de Fabricación y Pruebas de los lotes de suministros.
- Identificación de las tuberías con grabado longitudinal del logotipo de la casa comercial, indicando asimismo material, diámetro, espesor, presión de trabajo, normas y año de fabricación.

6.3.3 Columnas y depósitos a presión

Se realizará el suministro en unidades, según capacidad, perfectamente terminado sin defectos superficiales de fabricación o transporte. Se deberá recopilar del mismo modo la copia de solicitud y aceptación de suministro del material por el Adjudicatario y el

suministrador, con albarán de recepción. Es obligatoria la identificación de depósitos con placa situada al lado de la boquilla en la que figure la designación comercial, número de registro y fabricación, presión de testeo, presión de tarado, superficie exterior, capacidad y fecha de pruebas. Nuevamente se incluirán los siguientes ensayos:

- Inspección visual sin que se aprecien defectos de fabricación y/o transporte.
- Certificado de fabricación y pruebas de los lotes provistos.
- Certificado de homologación y tarado MINER.

6.3.4 Bombas

Será necesario comprobar:

- Instalación completa.
- El sistema de lubricación ha sido llenado de aceite.
- Verificación de que motor y bomba están perfectamente alineados.
- Componentes del sistema de limpieza están correctamente instalados y limpios.

6.3.5 Prueba hidráulica en taller

La Propiedad podrá exigir la realización de una prueba hidráulica en taller, debiendo el Adjudicatario reunir los fondos para poder realizarlos. La presión de *testing* que se estipulará en cada caso no será inferior a 1.5 veces la presión de diseño.

Si las pruebas revelasen defectos inadmisibles (fugas o deformaciones locales, por ejemplo) el Adjudicatario someterá a la aprobación de la Propiedad el procedimiento de reparación; una vez arreglada la montura se repetirá la prueba hidráulica.

6.4 Acta de fin de montaje

Cuando el Adjudicatario estime que los equipos están en condiciones óptimas para entrar en servicio, lo comunicará por escrito a la Propiedad y se procederá a una revisión general conjunta del montaje. Si procede, se levantará un acta de final de montaje firmada por representantes de ambas partes.

6.5 Ajustes, ensayos y servicio experimental

Una vez finalizada la etapa de montaje serán realizados los ajustes, ensayos y puestas en servicio experimentales de acuerdo con las condiciones establecidas. La instrucción de entrenamiento del personal de la Propiedad por parte del Adjudicatario será efectuada en este periodo.

Salvo que se establezca otro acuerdo, la transferencia del equipo y materiales objeto del suministro tendrá lugar en la fecha de su entrada en servicio industrial. No obstante, la cesión de posibles equipos importados por la Propiedad se desempeñará con la entrega del conocimiento de embarque, carta de porte o documento de similar alcance legal, si bien el riesgo y la garantía correrán por cuenta del Adjudicatario hasta su entrada en el enclave industrial.

6.6 Recepción provisional

Finalizado el servicio experimental y de modo simultáneo al comienzo del servicio industrial, será levantada (con anterioridad de los ensayos de recepción correspondientes) un Acta de Recepción Provisional firmada por representantes cualificados tanto de la Propiedad como del Adjudicatario. Si por motivos no imputables al Adjudicatario los ensayos de recepción no pudieran ser efectuados, la recepción provisional será considerada como realizada ciento veinte (120) días después de la fecha en la que los ensayos deberían haber comenzado. No obstante, el Adjudicatario está obligado a realizar estas pruebas antes de la fecha de recepción definitiva.

La Dirección Técnica levantará un Acta de Recepción de las Obras en la que se harán constar las posibles deficiencias en los trabajos (tres copias), así como el plazo para subsanar éstas. Si las obras se encuentran en condiciones óptimas y han sido ejecutadas en base a la formalización contractual, se darán por recibidas comenzando a contar en dicha fecha el plazo de garantía que será como mínimo de tres (3) meses.

En el caso de no hallarse la obra en estado de ser recibida, así se hará constar en el Acta, otorgándose además al Adjudicatario y/o Proveedor las instrucciones precisas y detalladas para solventar los defectos detectados y fijándose un plazo para subsanar éstos. Expirado dicho plazo, se realizará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones a fin de proceder nuevamente a la recepción provisional de las obras. Los trabajos de reparación corren por cuenta del Adjudicatario, de forma que de no cumplirse las prescripciones, el Contrato se verá rescindido con la pérdida de la fianza, tal y como se ha estipulado en el apartado 4.7 *Suspensión de las obras*.

6.7 Periodo de garantía

La fecha del Acta de Recepción Provisional será el comienzo del periodo de garantía. El Adjudicatario podrá mantener en la obra a parte de su personal especializado si bien la presencia de éste sea valorada convenientemente por la Propiedad en el caso de evaluar potenciales anomalías de funcionamiento o averías. La duración del periodo de garantía será la acordada entre la Propiedad y el Adjudicatario a la hora de la formulación del contrato y comenzará a contar a partir de la fecha de firma del Acta de Recepción Provisional.

Durante el plazo de garantía el Adjudicatario reemplazará cualquier pieza o equipo defectuoso, debido a una mala concepción, defecto o calidad inadecuada de las materias primas empleadas, defecto de fabricación o error de montaje. Todas estas sustituciones y trabajos civiles deberán ser realizados lo más rápido posible, corriendo todos los gastos por cuenta del Adjudicatario. No eximirá a éste el hecho de que el Ingeniero Directo haya examinado las obras durante su construcción, reconocidos sus materiales o hecha la valoración de la instalación; en el supuesto de observar defectos antes de la recepción definitiva se podrá determinar la demolición y posterior reconstrucción de las partes defectuosas.

Durante el periodo de garantía cualquier equipo, componente o pieza a sustituir por otro u otros en razón de la misma calidad tendrá a partir de la fecha de entrada en servicio un plazo de garantía igual al del equipo o pieza al que sustituya. Si como consecuencia de defectos o accidentes imputables al Adjudicatario el equipo no pudiese funcionar en parte o en todo el periodo de garantía, el tiempo en que el equipo no pueda operar será añadido al plazo de garantía.

6.8 Recepción definitiva

Transcurrido el plazo de garantía, previo reconocimiento de las obras y demás trámites reglamentarios, y en el supuesto de que todos los trabajos se encuentren en las debidas condiciones, se procederá a realizar la recepción última de las obras, elaborando consecuentemente la correspondiente Acta de Recepción Definitiva, en la que se relatarán las incidencias habidas durante el periodo de garantía y que deberá estar firmada por representantes cualificados de la Propiedad y el Adjudicatario.

Hasta que el representante de la Propiedad no haya aprobado la recepción definitiva de los trabajos, el Adjudicatario se hará cargo de averías, robos de material..., cualquiera que fuese el motivo, aun cuando el desperfecto se haya desarrollado en una operación ordenada por la Propiedad.

Si son necesarias pruebas de funcionamiento, capacidad de producción, etc..., para la recepción definitiva de algún elemento o del conjunto, el Adjudicatario dirigirá dichas pruebas y cargará con los gastos de todos los medios y creación de condiciones, salvo si parte de los gastos fueren incluidos en la adjudicación como obligaciones de la Propiedad. Con anterioridad a la recepción definitiva serán resueltas todas las reclamaciones planteadas, habiendo transcurrido los plazos de garantía de los compuestos sustituidos; podrán hacerse recepciones definitivas parciales en los casos en los que se considere oportuna esta decisión. Una vez realizada la recepción definitiva, cesa la garantía establecida.

7. Almacenamiento, transporte y seguros

7.1 Almacenamiento

La Propiedad indicará la capacidad de los almacenes o explanadas de propio acopio de los que dispondrá el Adjudicatario en obra, así como la fecha a partir de la cual podrá disponer de ellos. Queda terminantemente prohibido, salvo autorización expresa escrita del Ingeniero Director, efectuar acopios de materiales en zonas que dificulten el adecuado transcurso de los trabajos.

Los materiales se almacenarán de forma que se asegure la preservación de sus características para su uso en obra, requisito que deberá ser comprobado en el momento de dicho empleo. Las superficies empleadas como zonas de acopio deberán acondicionarse una vez finalizado el uso de los materiales en ellas, de modo que puedan

recuperar su aspecto original. Todos los gastos requeridos para efectuar el almacenamiento serán por cuenta del Adjudicatario.

7.2 Transporte

Salvo que la Propiedad indique lo contrario, compete al Adjudicatario transportar a las instalaciones de la obra todos los materiales y equipos objeto del suministro desde sus fábricas, colocándose en buenas condiciones de manejabilidad, conservación y seguridad en los lugares destinados por la Propiedad a tal fin. El Adjudicatario debe predecir que ninguna expedición sea hecha desde sus fábricas o desde la de sus suministradores sin aprobación previa por parte de la Propiedad, teniendo en cuenta que:

- Se respetarán las fechas previstas en el programa de trabajos.
- El escalonamiento de envíos en las fechas óptimas para la buena marcha de los trabajos y la óptima utilización de las superficies reservadas a parques.
- La eventual inspección de los embalajes y otras condiciones de trabajo.
- La eventual colaboración de la Propiedad en la resolución de problemas logísticos derivados de pesos excesivo, especialmente cuando la resolución dependa de Organismos Oficiales de Estado.

La aceptación por parte de la Propiedad de los embalajes, acondicionamiento y medios de transporte no exime al Adjudicatario de su responsabilidad en lo tocante al transporte, así como al funcionamiento y duración de los materiales y equipos expedidos. Los embalajes de los materiales y equipos entregados en las instalaciones de la obra pasarán a ser dominio de la Propiedad tras su uso. El Adjudicatario deberá prever que la Propiedad reciba para cada envío una lista de embalajes que contenga la información crítica permitiendo así una identificación fácil.

7.3 Seguros de transporte

El seguro de materiales y equipos en tránsito será realizado por el Adjudicatario, a no ser que la Propiedad desee suscribir un seguro por sí misma.

7.4 Importación de materiales y equipos

Los trámites aduaneros de los equipos fabricados en el extranjero y de los materiales (partes, piezas o accesorios) destinados a ser incorporados a los equipos fabricados en España serán hechos en nombre de la Propiedad por el Adjudicatario. En caso de que éste no pudiese llevar a cabo los trámites citados en la cláusula anterior, la Propiedad llevará a cabo la tramitación y despacho en aduanas de los materiales importados por cuenta del Adjudicatario, que obtendrá cuando corresponda la documentación necesaria para la importación y para el paso en tránsito por terceros países, en el supuesto de que fuese necesario.

El Adjudicatario deberá comunicar por escrito a la Propiedad, por cada fabricante extranjero y en relación con el equipo a importar, los siguientes elementos: designación,

peso líquido, valor, procedencia y divisa de pago. Deberá obtener también la documentación necesaria para que los trámites aduaneros se efectúen en las mejores condiciones independientemente de que la Propiedad gestione, en caso de que sea necesario, la exención de derechos de importación.

8. Organización de las obras

8.1 Dirección de las obras y representación del Adjudicatario

La Dirección del conjunto de las obras estará a cargo del personal técnico de la Propiedad. Se hará saber al Adjudicatario quien es el Ingeniero Director de las obras cuyas principales funciones son:

- Exigir al Adjudicatario el cumplimiento de las condiciones contractuales.
- Garantizar la ejecución de las obras con estricta sujeción al Proyecto aprobado incluyendo las modificaciones debidamente autorizadas, y el cumplimiento del programa de trabajos.
- Definir aquellas condiciones técnicas que el presente Pliego de Condiciones deje a su decisión.
- Resolver todas las ecuaciones técnicas que surjan en tanto a interpretación de planos, condiciones de materiales y de ejecución de unidades de obra, siempre que no se modifiquen las condiciones del contrato.
- Estudiar las incidencias o problemas planteados en los trabajos que impidan el normal cumplimiento del contrato o aconsejen su cambio, tramitando las propuestas correspondientes.
- Proponer las actuaciones para obtener los permisos y autorizaciones para la ejecución de las obras y ocupación de los bienes afectados por ellas, así como resolver los problemas planteados por los servicios y servidumbres relacionados.
- Asumir personalmente la dirección inmediata de determinadas operaciones o trabajos en curso en casos de urgencia o gravedad.
- Participar en las recepciones provisional o definitiva y redactar la liquidación de las obras, conforme a las normas legales establecidas.

El Adjudicatario estará obligado a prestar su colaboración al Ingeniero Director para el normal cumplimiento de las funciones a éste encomendadas. Antes de iniciarse los trabajos, el Adjudicatario deberá indicar a la Propiedad el nombre de su representante al frente de los mismos (Jefe de Montaje), tanto en los aspectos técnicos como económicos. Los poderes del Jefe de Montaje deben ser lo suficientemente amplios para recibir y resolver en consecuencia las comunicaciones y órdenes de la Propiedad. En ningún momento servirá de excusa al Adjudicatario la ausencia de su representante a pie de obra.

También antes del comienzo de las obras, el Adjudicatario deberá presentar para su aprobación la relación nominal del personal técnico que se ocupará de la ejecución de

los montajes, indicando las funciones a desarrollar por cada uno de ellos. La Propiedad se reserva el derecho a recusar al jefe o a cualquier otro técnico destinado por el Adjudicatario en la obra durante el desarrollo de los trabajos, viéndose obligado a sustituirlo por otro de igual categoría en un plazo de treinta (30) días. En caso de que, a consideración de la propiedad, el personal técnico designado por el Adjudicatario no sea suficiente para la buena marcha de las obras, quedará obligado a completar su organización con el número de técnicos que fuese necesario según el criterio de la Propiedad, en consonancia a lo introducido en el apartado 6.2 *Montaje e inspección*.

8.2 Terrenos para la ejecución de las obras

La Propiedad indicará al Adjudicatario los límites de los terrenos de su propiedad de los cuales le permite montar sus instalaciones, y dará acceso a los mismos. Todo esto aparecerá reflejando en los planos que se entreguen a los concursantes para el estudio de las ofertas.

Se supone en el Adjudicatario un conocimiento perfecto de la disposición del conjunto de terrenos, de la importancia y situación de los trabajos objeto del contrato, de la naturaleza y estado de los terrenos, de los emplazamientos reservados para las obras, de los medios de acceso y de las condiciones climáticas de la región, en especial de aquellas que puedan afectar a los trabajos. La obligación de la Propiedad en cuanto entrega de terrenos necesarios queda limitada a las parcelas que figuran y se reseñan en los planos que se entregan a los concursantes con la petición de oferta, debiendo estos últimos definir lo que se entiende por la zona de montaje.

Si por conveniencia del Adjudicatario éste dejase disponer de otros terrenos distintos de los figurados y reseñados en los planos mencionados en el párrafo anterior, correrá por su cuenta la adquisición de las autorizaciones pertinentes, debiendo el Adjudicatario someter previamente a la aprobación de la Propiedad las modalidades de adquisición o de obtención de la autorización oportuna.

El Adjudicatario se hará responsable de los daños que pueda causar en las vías públicas y en los caminos de acceso si éstos son de particulares o de la propiedad. Del mismo modo, está en la obligación de cumplir todas las limitaciones y solicitar los permisos de transportes especiales. En cualquier caso, el Adjudicatario responderá por todos los perjuicios que como consecuencia del contrato se puedan causar a terceras personas, siendo de su competencia las reclamaciones que se puedan formular.

8.3 Instalaciones auxiliares

En caso de que la obra se construya en una zona en la que la Propiedad distribuya energía eléctrica, esta facilitará al Adjudicatario la potencia necesaria para sus instalaciones y le comunicará la cantidad que le cobrará por la energía consumida. La red de distribución de energía en las zonas de obra será por cuenta del Adjudicatario, deberá estar constituida por cables aislados y no deberá interferir en otros trabajos en marcha, por lo que su instalación deberá ser previamente autorizada por la Propiedad

en caso de estar ubicada en el recinto de la obra, debiendo cumplir todas las normas y reglamentos oficiales vigentes.

El abastecimiento de agua y aire comprimido será por cuenta del Adjudicatario y su instalación deberá cumplir las normas y reglamentos oficiales en vigor. La Propiedad podrá facilitar, en caso de disponer de los mismos, materiales y medios auxiliares en las condiciones que se establezcan. Serán por cuenta y responsabilidad del Adjudicatario:

- Medios y materiales necesarios para la construcción, desmontaje, demolición o retirada en el plazo que se le indique, de oficinas, almacenes, comedores...
- Los medios para garantizar la vigencia y conservación del material almacenado en obra o curso de montaje.
- Todas las herramientas o medios necesarios para la ejecución del montaje.
- Todos los ensayos de componentes o materias primas que se estimen necesarios en curso de montaje.
- Las diligencias o gastos necesarios para la realización de las operaciones normales de inspección por parte de los organismos oficiales.

El Adjudicatario no podrá ampararse en las dificultades que puedan ser ocasionadas por la realización simultánea de otros trabajos o instalaciones confiadas por la Propiedad a otros contratistas o suministradores que intervengan en la realización del mismo proyecto para eludir obligaciones contractuales. Asimismo, no podrá reclamar si en el curso de los trabajos y para el adecuado cumplimiento del contrato fuese preciso aumentar la importancia de su material, en calidad y cantidad, respecto a sus previsiones iniciales.

No obstante, cuando el Adjudicatario se vea obligado a poner en servicio material suplementario para responder, bien a contingencias o bien a causas de fuerza mayor debida comprobadas y en ambos casos reconocidas previamente por la Propiedad, la utilización de ese material será de abono por aplicación de precios complementarios establecidos de común acuerdo, conforme a las disposiciones que se fijan en el presente Pliego de Condiciones.

8.4 Relación entre la Propiedad y el Adjudicatario

El Adjudicatario está obligado a suministrar en cualquier momento toda la información relativa a la ejecución del contrato que la Propiedad juzgue necesario conocer por causa de las posibles incidencias de los trabajos al Adjudicatario. En ningún caso las peticiones de información supondrán injerencias en la ejecución del contrato ni entrañarán una participación de la Propiedad en la responsabilidad del Adjudicatario. Estas peticiones tendrán únicamente un carácter informativo.

En todo caso, el Adjudicatario es el único responsable del ejercicio de la función que le es propia, en orden a las obligaciones del contrato. Siempre que sea requerido, el Adjudicatario, o a efectos de su representante, deberá presentarse en el domicilio de la

Propiedad de la obra con el fin de que no pueda imputarse su ausencia como causa de retraso o suspensión del cumplimiento de las órdenes de la Propiedad. La coordinación de las actividades del Adjudicatario necesarias para la ejecución del suministro con la de otros contratistas de la Propiedad es competencia de ésta última.

Siempre que el Adjudicatario establezca contrato con otros contratistas de la Propiedad para tratar asuntos relativos a la buena ejecución del suministro, estará obligado a enviar a la Propiedad copias de las comunicaciones y correspondencia producida, de forma que las decisiones tomadas durante tales contactos únicamente se harán efectivas de ser aprobadas por escrito por la Propiedad.

Si como consecuencia de los anteriores contactos surgiesen diferencias o dificultades, el Adjudicatario deberá pedir una reunión con la Propiedad o sus representantes, que las resolverán con arreglo a los contratos establecidos con las partes implicadas. Las reuniones de esta naturaleza deberán ser solicitadas con una antelación de al menos diez días. La Propiedad, siempre que lo estime conveniente, convocará a iniciativa suya o petición del Adjudicatario, reuniones con éste, y de ser necesario con otros contratantes, con el propósito de discutir y resolver de acuerdo con el programa de trabajos aprobado, los problemas que resulten de la coordinación de las obras en curso, de la ocupación sucesiva de locales en la obra y de la disponibilidad de medios de utilización común, entre muchos otros puntos.

Cuando varios contratistas y suministradores empleen las instalaciones generales pertenecientes a uno de ellos, se pondrán de acuerdo sobre este uso suplementario y el reparto de gastos correspondiente. La Propiedad deberá estar permanentemente informada de los acuerdos a los que lleguen los distintos contratistas o suministradores para, en el caso de presentarse dificultades o diferencias, tomar la resolución que proceda o actuar como árbitro; la decisión es obligatoria para los interesados. Cuando varios contratistas y suministradores trabajen en la misma obra, cada uno de ellos es responsable de los daños y perjuicios de toda clase que puedan derivarse de su propia actuación.

8.5 Subcontratación de obras

A menos que el contrato disponga lo contrario, el Adjudicatario podrá contratar a terceras partes para la realización de determinadas unidades de obra, cumpliendo la siguiente metodología de procedimiento:

- Notificar por escrito al Ingeniero de la subcontrata las partes de obra a realizar y las condiciones económicas, de modo que éste las pueda autorizar con anterioridad.
- Las unidades de obra que el Adjudicatario contrate con terceros no debe exceder el 50% del presupuesto total de la obra principal.

La subcontratación deberá supeditarse a la autorización previa por parte de la Propiedad; en cualquier caso, ésta no quedará vinculada ni reconocerá ninguna obligación contractual con la subcontrata, de forma que cualquier subcontratación de obra no eximirá al Adjudicatario de ninguna de sus obligaciones con respecto a la Propiedad.

8.6 Personal de montaje

Es por cuenta y responsabilidad del Adjudicatario el reclutamiento de todo el personal especializado, no especializado y auxiliar para la dirección y ejecución del montaje, así como todos los gastos de personal, tales como viajes, alojamientos, dietas, desplazamientos del personal, alojamiento en obra y desplazamientos en el seno de la propia obra. Cualquiera que sea la nacionalidad del Adjudicatario, el reclutamiento de personal deberá cumplir las leyes en vigor. Si el Adjudicatario emplea en obra personal extranjero, será de su cuenta y cargo la obtención de las condiciones necesarias para que pueda trabajar en España.

Todos los trabajadores acatarán las leyes laborales en cuanto a horarios, seguros sociales, etc..., además de aquellas de carácter general que estén vigentes para el personal de la obra. Al frente de cada trabajo de montaje el Adjudicatario deberá tener un técnico titulado de cualquier especialidad o condición que pueda acreditar de manera satisfactoria ante la Propiedad su competencia en la clase de trabajos que desempeñe.

El Adjudicatario es responsable de los fraudes o malversaciones que sean cometidas por su personal en el suministro o empleo de materiales. El número de trabajadores de cada profesión deberá ser siempre proporcional a la obra a ejecutar en base a los plazos establecidos. El Adjudicatario deberá remitir a la Propiedad, siempre que lo solicite, una relación del personal presente en la obra, clasificado por categoría profesional, siendo su misión el mantenimiento de la disciplina y el orden en los lugares de trabajo.

La Propiedad se reserva el derecho a exigir la retirada de la obra de cualquier operario al servicio del Adjudicatario, por motivo de falta de obediencia y respeto, o a causa de actos que comprometa o perturben la marcha de la obra; el Adjudicatario podrá recurrir si estimase que no hay motivo claro para dicha prohibición.

8.7 Seguros y asistencia médica

El Adjudicatario no podrá comenzar los trabajos sin justificar la cobertura de los seguros por accidentes de trabajo y enfermedades laborales, de acuerdo con la legislación vigente. El Adjudicatario asegurará por sí mismo o por medio de la compañía de seguros adecuada la prestación de asistencia médica o de enfermedad al personal. Es asimismo responsable de las condiciones de seguridad de los trabajos, estando obligado a adoptar y hacer aplicar, a su costa, las disposiciones vigentes sobre esta materia, las medidas que dicten la Inspección de Trabajo y demás organismos competentes y las normas de seguridad que correspondan a las características de las obras contratadas.

Con el objetivo de organizar colectivamente y de inspeccionar la seguridad y la higiene de las obras, todos los contratistas que trabajen en las mismas deberán agruparse en una Junta Central de Seguridad formada por los representantes de las empresas que tendrá como misión coordinar las medidas de seguridad adoptadas por los comités u organizaciones de seguridad de cada una de las empresas.

9. Abono de las obras

9.1 Definición de precios

Los gastos de bienes y servicios objetos de suministro serán expresados en euros y cubrirán la fabricación, el suministro y el montaje de todos los equipos ensayados y en funcionamiento, así como los repuestos y servicios adicionales que se especifiquen. Los gastos de primer establecimiento, desmontaje y retirada de las instalaciones de obra estarán incluidos en el precio del suministro.

Todos los precios unitarios o globales comprenden, sin excepción ni reserva, además del beneficio del Adjudicatario la totalidad de los gastos y cargas ocasionadas por la ejecución en los plazos establecidos de los trabajos correspondientes a cada uno de ellos, incluidos los que resulten de las obligaciones impuestas al Adjudicatario por los diferentes documentos del contrato y por el presente Pliego de Condiciones. El precio de los materiales y equipos que componen el suministro abarcará:

- Coste de fabricación, incluido el embalaje adecuado.
- Costes de transporte a pie de obra y distribución dentro de esta.
- Coste del seguro de transporte.
- Coste unitario de piezas de repuesto que se establezcan.

En el precio de materiales y equipos estarán incluidos los estudios de fabricación, dibujos, esquemas eléctricos, etc..., así como los derechos de patente y demás que puedan incidir sobre los mismos, quedando la Propiedad libre de cualquier exigencia por parte de terceros sobre los citados derechos. En el precio de transporte estarán incluidos cargas, descargas, transbordos, colocación en almacén, guarda, así como los aranceles aduaneros en caso de haberlos. El coste y montaje contendrá los gastos de instrucción y adiestramiento del personal de la Propiedad que se hará cargo de la explotación de las instalaciones, el precio de los seguros y los ensayos de los equipos e instalaciones realizados, siguiendo las pautas fijadas en el presente Pliego.

9.2 Prestaciones accesorias y trabajos por admisión

El Adjudicatario está obligado a realizar a título accesorio trabajos de pequeña importancia y prestaciones complementarias en régimen de Administración. Los trabajos realizados en este formato se liquidarán del siguiente modo:

$$I = (J + M) \cdot \frac{100 + n}{100} \quad (1)$$

en donde J es el importe total de la mano de obra directamente empleado en los trabajos, obtenido aplicando al total de horas trabajadas por personal obrero de cada categoría la tarifa media horaria correspondiente, según baremo establecido. M es el precio pagado según factura de los materiales y suministros utilizados en estos trabajos, incluido el transporte hasta almacén de obra y n es el porcentaje de aumento sobre los conceptos anteriores, que cubre los demás gastos. Este valor se fijará en el contrato y será siempre menor o igual que veinte (20).

La ecuación 1 hace referencia a la liquidación del empleo de mano de obra y materiales; para el empleo de equipo auxiliar (mano de obra directa, combustibles y energía correspondientes al uso de maquinaria o equipo auxiliar) se abonará al Adjudicatario por aplicación de la misma fórmula. Además, se abonará al Adjudicatario una remuneración según tarifa, expresada en tanto por mil, en concepto de uso de maquinaria (incluyendo gastos de conservación, reparaciones y cambios).

Se empleará una o varias tarifas según el tipo de maquinaria, expresados siempre en tanto por mil del valor de la máquina por hora efectiva de utilización, o bien por día natural de uso.

Cuando se decida de común acuerdo traer nueva maquinaria a la obra (especialmente por trabajos de Administración) se empleará también la ecuación 1, pero se asegurará al Adjudicatario una remuneración diaria mínima en concepto de inmovilización expresada también en un tanto por mil del valor de la máquina. Además se abonará al Adjudicatario el transporte de la maquinaria a obra.

Cuando una máquina sea empleada con posterioridad a la fecha en que su empleo era necesario para terminar los trabajos objeto del presente Contrato, a partir de la misma se asegurará al Adjudicatario la percepción del mínimo de inmovilización antes señalado. Los importes obtenidos por todas las expresiones anteriores se incrementarán también en el mismo porcentaje n. El Convenio de Adjudicación o el Pliego de Condiciones Particulares establecerán los detalles complementarios que sean precisos.

9.3 Trabajos no previstos

Cuando se juzgue necesario ejecutar trabajos no previstos se prepararán los precios contradictorios correspondientes teniendo en cuenta los del contrato, o por asimilación, los de obras semejantes. Los nuevos precios se basarán en las mismas condiciones económicas que los precios del contrato. A falta de mutuo acuerdo y en espera de la solución de la discrepancia se liquidará provisionalmente al Adjudicatario en base a los precios fijados por la Propiedad.

Si no hubiese conformidad en la fijación de dichos precios entre la Propiedad y el Adjudicatario, éste quedará relegado de la construcción de la parte de la obra que se trate, sin derecho a indemnización de ninguna clase. En esta situación en la que, a juicio de la Propiedad, sea imposible el fijar nuevos precios, o así le convenga a esta última,

corresponderá únicamente a ella la decisión de abandonar excepcionalmente los trabajos en régimen de administración.

Cuando se proceda al empleo de los materiales o ejecución de las obras de que se trate, sin la previa aprobación de los precios que hayan de aplicárseles, se entenderá que el Adjudicatario está en conformidad con lo fijado por la Propiedad.

9.4 Revisión de precios

En caso de cambio de las condiciones económico-financieras en el transcurso de la ejecución del contrato, los precios establecidos serán revisados por la aplicación de la siguiente fórmula general:

$$P = P_0 \cdot K \quad (2)$$

en donde P es el precio origen a revisar, P_0 es el nuevo valor del precio P tras la revisión y K es un factor de corrección calculado según la siguiente expresión:

$$K = 0.15 + a \cdot \frac{H_i}{H_0} + b \cdot \frac{M_i}{M_0} \quad (3)$$

donde a y b son coeficientes de influencia que cumplen la característica de que su suma es 0.85, H_0 y H_i son los índices correspondientes a mano de obra en la fecha de presentación de la oferta y en el periodo en el que se ha calculado la revisión respectivamente y M_0 y M_i son los índices correspondientes a materiales en la fecha de presentación de ofertas y en el periodo en el curso del cual se ha calculado la revisión, respectivamente.

Los índices que han de emplearse en la formulación de las expresiones de revisión serán los índices oficiales de precios sometidos mensualmente a la aprobación del Gobierno por el Comité Superior de Precios de Contratos del Estado y publicados en el B.O.E. Para un mismo contrato se pueden prever uno o varios coeficientes K, aplicándose cada uno de ellos a un determinado grupo de precios. La revisión de los precios se realizará únicamente en caso de producirse variaciones en los índices previstos en cada caso.

La Propiedad establecerá en cada caso particular la fórmula o fórmulas de revisión a emplear y las normas complementarias de aplicación de las mismas. Salvo que se indique lo opuesto, serán de aplicación las fórmulas oficiales aplicables a las obras realizadas para el Estado que aparecen en las memorias de Comisión de Precios, publicadas periódicamente por el Ministerio de Obras Públicas.

Si los trabajos no han terminado al final del plazo global de ejecución previsto en el Convenio, se verán prolongados en un tiempo igual al de los retrasos reconocidos y aceptados por la Propiedad resultantes de circunstancias no imputables al Adjudicatario, y los coeficientes K a emplear no podrán ser superiores a los alcanzados en la época de terminación del plazo. Todos los valores inferiores de estos índices serán aplicados a partir de la época en la que los mismos se hayan constatado.

En principio no serán revisables más que los precios que se refieren a prestaciones efectuadas en el territorio español; además, cuando estos precios contengan elementos que dependan de un sistema económico su revisión se limitará únicamente a la fracción de cada uno de ellos que dependa de las variaciones económicas comprobadas en España. Si el contrato prevé excepcionalmente la revisión de los precios que dependan en su totalidad o en parte de un sistema económico extranjero, el importe revisado por medio de las fórmulas contractuales previstas a este efecto estará limitado al valor obtenido:

- Convirtiendo el precio inicial, cuando esté fijado en divisas extranjeras, en euros, al tipo de cambio aplicable en la fecha de referencia de precios.
- Aplicando al precio inicial, expresado en euros, la fórmula de revisión contractual, después de haber reemplazado los índices en vigor en el país extranjero por los índices o tipos de la misma naturaleza establecidos en el contrato.
- Convirtiendo el importe obtenido en divisas al cambio aplicable en las fechas de revisión.

9.5 Condiciones de pago

A efectos de pago del equipamiento y servicios contemplados en el contrato, serán tenidas en consideración las siguientes partidas:

- Equipo y materiales entregados en el local de montaje.
- Montaje e instrucción del personal de explotación de la Propiedad.

En el contrato figurará una cláusula en la que se indique nítidamente la forma en que la Propiedad efectuará los pagos del equipo y materiales. El coste del montaje será abonado totalmente en la fecha de recepción definitiva de las instalaciones, salvo que se especifique otro acuerdo en el contrato, que indicará el porcentaje sobre el coste total de suministros y servicios presentados por el Adjudicatario, que no se abonarán hasta el fin del plazo de garantía.

9.6 Penalizaciones

Podrán aplicarse penalizaciones al Adjudicatario e incluso podrá llegarse a la rescisión del contrato en los siguientes casos:

- No respeto de las fechas del programa general de trabajos.
- Retraso en la entrega de documentación técnica.
- Si el equipo, o parte de él, no fuese quien de asegurar el servicio industrial para el cual fue concebido la planta.
- Si los resultados de las medidas y ensayos no se correspondiesen a los valores garantizados.

Aparte de la posibilidad de rescisión del contrato, el Adjudicatario tomará a su cargo los gastos ocasionados por sus retrasos. Las penalizaciones o rescisión del contrato a que se ha hecho referencia serán aplicadas después de que la Propiedad compruebe la imposibilidad por parte del Adjudicatario de corregir las faltas o defectos verificados, y después de haber introducido en el plazo autorizado por la Propiedad las modificaciones de equipo. La cuantía de las penalizaciones será determinada y calculada en cada caso particular en función del perjuicio ocasionado a la Propiedad, que notificará al Adjudicatario mediante carta certificada con acuse de recibo su aplicación.

9.7 Indemnización a favor del Adjudicatario

El único caso en el cual el Adjudicatario tuviere derecho a una indemnización es debido a pérdidas, averías y daños imputables a la Propiedad (debidamente comprobados), y eventualmente cuando estos sean imputables a causa de fuerza mayor. El Adjudicatario adoptará las disposiciones necesarias para que su material e instalaciones no pueda sufrir daños de ningún tipo, como consecuencia de fenómenos naturales previsibles de acuerdo con la situación u orientación de la obra.

En el supuesto de que el Adjudicatario estime que existen causas de fuerza mayor, comunicará por escrito este suceso a la Propiedad en un plazo máximo de diez (10) días después de darse las circunstancias. La Propiedad se reserva el derecho de fijar en cada caso las indemnizaciones que puedan concederse al Adjudicatario y decidir si el motivo de reclamación se puede incluir en lo reseñado al comienzo de este apartado. Pasado este periodo de tiempo no se admitirá ninguna reclamación.

Se considerarán a estos efectos como causas mayores las indicadas en el Pliego de Condiciones Generales para la contratación de obras públicas.

9.8 Rescisión del contrato

En el caso de que la Propiedad orden el cese absoluto de los trabajos, el contrato queda inmediatamente rescindido. Si la Propiedad ordena su aplazamiento por más de un año, sea antes o después del comienzo de las obras, el Adjudicatario tiene derecho a la rescisión, si lo solicita por escrito, sin que ello tenga perjuicio alguno sobre la indemnización que tanto en un caso como en otro le corresponda, si hay lugar a ello. No se aceptará la petición de rescisión por parte del Adjudicatario cuando sea presentada en un plazo superior a los cuatro (4) meses a partir de la fecha de notificación de la orden de servicio, prescribiendo el cese o aplazamiento de los trabajos.

Si la Propiedad ordena el aplazamiento de los trabajos durante un periodo menor a un año, el Adjudicatario no tendrá derecho a rescisión pero sí a una indemnización en caso de perjuicios debidamente constatados. En el caso de que hubiesen comenzado los trabajos, el Adjudicatario puede requerir que se proceda a la recepción provisional de las obras acabadas y en estado de ser recibidas, a la recepción definitiva.

En caso de fallecimiento del Adjudicatario, el contrato será revocado de pleno derecho salvo que los herederos se comprometan por escrito a cumplir el contrato en vigor, sin incorporar en él modificación alguna, según lo estipulado en el apartado 4.7 *Suspensión de las obras*. En caso de quiebra o de suspensión de pagos por parte del Adjudicatario, el contrato queda inmediatamente rescindido de pleno derecho, bastando para ello que la Propiedad lo notifique de forma fehaciente en el plazo de dos meses a partir de la publicación legal de la declaración de quiebra o de la suspensión de pagos.

En todo momento las medidas de conservación o de seguridad cuya urgencia sea manifiesta, serán tomadas de oficio por la Propiedad con cargo al Adjudicatario, sin perjuicio de la decisión definitiva del tribunal. Cuando el Adjudicatario no dé cumplimiento, sea a las disposiciones u obligaciones del contrato o a las órdenes dadas por la Propiedad, éste se exhortará a cumplir estos requisitos o demandas en un plazo determinado que, salvo en casos de urgencia, no será menor de diez días de la notificación. Pasado este plazo, si el Adjudicatario no ha ejecutado las disposiciones prescritas la Propiedad podrá ordenar, a título provisional, el establecimiento de un régimen de intervención general o parcial por cuenta del Adjudicatario.

Se procederá inmediatamente, en presencia del Adjudicatario o habiéndose convocado debidamente, a la comprobación de los trabajos realizados, de los materiales acopiados así como al inventario descriptivo de su material y a la devolución a éste de la parte de los materiales que no usará la Propiedad para la terminación de los trabajos. Ésta tiene, por otra parte, la facultad bien de ordenar la convocatoria de un nuevo concurso, en principio sobre petición de ofertas (por cuenta y riesgo del Adjudicatario insumiso), bien de ejecutar el derecho de rescisión de contrato o bien de prescribir la continuación de la intervención.

Durante el periodo del régimen de intervención, el Adjudicatario podrá conocer la marcha de los trabajos sin que pueda de ninguna manera entorpecer o dificultar las órdenes de la Propiedad. El Adjudicatario podrá ser liberado del régimen de intervención si justifica su capacidad para volver a hacerse cargo de los trabajos y llevarlos a buen fin. Los excedentes de gastos que resulten de la intervención o del nuevo contrato serán deducidos de las sumas que puedan ser debidas al Adjudicatario, sin perjuicio de los derechos a ejercer contra él en caso de ser insuficientes.

Si la intervención o el nuevo contrato suponen, por el contrario, una disminución de gastos, el Adjudicatario no podrá pretender beneficiarse de ninguna parte de la diferencia que quedará a favor de la Propiedad. En todos los casos de rescisión se procederá con el Adjudicatario o sus derechohabientes presentes a la comprobación de los trabajos realizados así como al inventario de obra.

Cuando se produzca la rescisión de la obra por otros conceptos que no sea la petición de esta por parte de la Propiedad, ésta puede exigir al Adjudicatario que mantenga en obra todo o parte de sus instalaciones generales o de su material con el fin de poder

disponer libremente la prosecución de los trabajos, encargando su ejecución a otra empresa. Las instalaciones, maquinaria, etc... que la Propiedad decida que deben permanecer en obra podrán ser utilizadas por ésta o por otra empresa de su elección hasta la terminación de las obras objeto del contrato rescindido, sin pago alguno por parte de la Propiedad o de dicha empresa designada en concepto de alquiler o amortización.

Los materiales existentes de la obra y que la Propiedad decida emplear en la terminación de las obras serán abonados según los precios incluidos en el contrato anulado o según los que se fijen en su peritaje. En los casos de rescisión por decisión de la Propiedad, se acordará entre ésta y el Adjudicatario cuáles instalaciones deben permanecer en la obra y la indemnización a pagar por la Propiedad en ese concepto. En ningún caso podrá el Adjudicatario retirar cosas sin autorización escrita.

En caso de rescisión del contrato, la Propiedad le comunicará un plazo de cuatro meses a partir de la fecha de rescisión para indicar qué debe permanecer en la obra; también le indicará el plazo para retirar aquello que no se vaya a emplear en la terminación de los trabajos. Debe indicarse que todas las menciones del Adjudicatario realizadas bajo este epígrafe pueden ser sustituidas por sus derechohabientes.

9.9 Legislación

Las leyes españolas regularán las fases de concurso y establecimiento del contrato. El Adjudicatario queda obligado a respetar las disposiciones generales prescritas en la legislación española vigente aplicables a la ejecución del contrato y a acatar las consecuencias de su incumplimiento. El Adjudicatario y la Propiedad acuerdan someter la resolución de todas las divergencias, controversias y discrepancias que pueda dar lugar la interpretación o la ejecución del contrato de las obras, al juicio arbitral del derecho privado, de acuerdo con las normas establecidas en la Ley de 22 de diciembre de 1983.

El arbitraje será de equidad. Los árbitros resolverán sobre los puntos concretos que se sometan a su decisión en la correspondiente escritura notarial de formalización del compromiso y dentro del plazo que en la misma se señale. Los honorarios de los árbitros serán sufragados a partes iguales entre el Adjudicatario y la Propiedad. Contra el laudo emitido por los árbitros, con arreglo a su saber y entender, únicamente cabrá recurso de nulidad ante la Sala del Tribunal Supremo por los motivos que se indican en el 3º párrafo del artículo 1696 de la Ley de Enjuiciamiento Civil.

PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES

1. Disposiciones generales pliego de condiciones particulares

1.1 Objeto

El presente pliego de prescripciones técnicas se adjunta con el fin de introducir la ordenación de las condiciones técnico-facultativas que deben regir en la instalación de la planta descrita en este proyecto.

Las obras del proyecto consisten en la instalación de los equipos necesarios en una planta de producción de acetato de etilo a partir de bioetanol. En lo referente a la definición y acabado de las distintas unidades de obra se deberá considerar que todos los trabajos, medios auxiliares y materiales que sean necesarios para la correcta ejecución y finalización de cualquier unidad de obra, según el criterio del Director de Obra, se consideran ya incluidos en el precio de la misma aun cuando no figuren especificados en la descomposición o descripción de los precios.

2. Edificación

2.1 Condiciones generales

2.1.1 Calidad de los materiales

Todos los materiales a emplear en la presente obra deberán ser de primera calidad y deben reunir las condiciones exigidas vigentes a materiales y prototipos de construcción.

2.1.2 Pruebas y ensayos de materiales

Todos los materiales a los que se hace referencia en el presente Pliego de Condiciones particulares podrán ser sometidos a los análisis y pruebas que se crean necesarios para acreditar su calidad. Cualquier otro material que sea necesario deberá ser aprobado por la Dirección de las obras, siendo rechazado en caso de no reunir las condiciones exigidas por la buena práctica de la construcción.

2.1.3 Materiales no previstos en el Proyecto

Los materiales que no hayan sido previstos en el Proyecto también tendrán que reunir las condiciones de calidad necesarias, no teniendo el Adjudicatario derecho a reclamación alguna por las condiciones exigidas.

2.1.4 Condiciones generales de ejecución de las obras

Todo los trabajos incluidos en el presente documento se realizarán con esmero en arreglo a las buenas prácticas de construcción de acuerdo a las condiciones establecidas en el Pliego de Condiciones de la Dirección General de Arquitectura de 1960, y cumpliendo estrictamente las instrucciones recibidas por la Dirección de Obra, no sirviendo por tanto como pretexto al Adjudicatario la baja puja, para cambiar la

ejecución de las obras ni la primera calidad de los materiales ni de la mano de obra, ni emprender proyectos adicionales a los que tiene por objeto este documento.

2.2 Condiciones a cumplir por los materiales

2.2.1 Materiales para hormigones y morteros

2.2.1.1 Áridos

La naturaleza de los áridos y su preparación será la que asegure la adecuada resistencia del hormigón, así como de las restantes características que se exijan a este en el presente Pliego de Condiciones Particulares. Como áridos para la fabricación del hormigón puede emplearse arena o grava existente en yacimientos naturales, u otros productos cuyo empleo se encuentre aceptado por la práctica o resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en un laboratorio oficial; en cualquier caso, cumplirá las condiciones de la EHE (Instrucción de Hormigón Estructural).

Cuando no se tengan antecedentes sobre el uso de los áridos disponibles o se vayan a utilizar para otras aplicaciones distintas de las aceptadas por la práctica, se realizarán ensayos de identificación mediante análisis mineralógicos, físicos o químicos según convenga en cada caso. En el supuesto de emplear escorias de la industria siderúrgica como árido, se comprobará previamente que son estables (básicamente que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos); esta constatación se realiza según lo estipulado en el método de ensayo UNE-7243.

Queda terminante prohibido el empleo de áridos que contenga sulfuros oxidables. Se entiende por arena o árido fino al que pasa por un tamiz de cinco (5) mm de luz de malla; por grava o árido grueso se entiende el que queda retenido en dicho filtro. Finalmente, árido total (o simplemente árido) se denomina a aquel que posee las proporciones de arena y grava adecuadas para fabricar el hormigón necesario en el caso particular que se considere.

2.2.1.2 Agua para amasado

El agua para amasado debe cumplir las siguientes características:

- Un pH mayor que 5, según la norma UNE-7234.
- Menos de 15 g/L de sustancias solubles, según la norma UNE-7130.
- Menos de 1 g/l de sulfatos (SO_4), según ensayo de la norma UNE-7131.
- Menos de 6 g/L de cloro (Cl^-), según la norma UNE-71178.
- Menos de 15 g/L de grasas o aceites de cualquier clase, según norma UNE-7235.
- 0 g/L de azúcares o carbohidratos, según la norma UNE-7132.
- Demás prescripciones de la Instrucción de Hormigón Estructural.

2.2.1.3 Aditivos

Se definen como aditivos a emplear en hormigones y morteros a aquellos productos (sólidos o líquidos) excepto cemento, áridos y agua, que mezclados durante el amasado mejoran las características del mortero o el hormigón en especial en lo referente al

fraguado, endurecimiento y plasticidad, para los cuales se establecen los siguientes límites:

- Si se utiliza cloruro cálcico como catalizador, su dosificación será igual o menor al 2% en peso de cemento, y si se trata de amasar a temperaturas muy bajas, del 3.5%.
- La proporción de aireante será mayor del 4% en peso de cemento.
- En el caso de emplear colorantes la proporción será inferior al 10% en peso de cemento, quedando prohibido el empleo de colorantes orgánicos.
- Cualquier otro que se derive de la aplicación de la Instrucción de Hormigón Estructural.

2.2.1.4 Cementos

Se entiende como un aglomerante hidráulico el que responde a alguna de las definiciones del Pliego de Prescripciones Técnicas General para la recepción de cementos del Real Decreto vigente. Podrá ser almacenado en sacos o a granel; en el primer caso el recipiente protegerá el cemento contra la intemperie y la humedad tanto del suelo como de las paredes. Los métodos de ensayo serán los detallados en el citado Pliego General de Condiciones para la recepción de conglomerantes hidráulicos. Se realizarán en laboratorios homologados. Se tendrán en cuenta con prioridad las determinaciones de la instrucción EHE.

2.2.2 Aceros

2.2.2.1 Acero de alta adherencia en redondos para armaduras

Se aceptarán aceros de alta adherencia que lleven el sello de conformidad CIETSID homologado por el Ministerio de Fomento. Estos aceros vendrán marcados de fábrica con señales indelebles para evitar confusiones en su empleo, sin presentar grietas, curvaturas, sopladuras ni disminuciones de sección superiores a un 5%.

El módulo de elasticidad de Young será igual o mayor a $2\,100\,000\text{ kg/cm}^2$, definiendo como límite elástico la mínima tensión capaz de producir una deformación permanente del 0.2%; se prevé el límite elástico del acero en $4\,200\text{ kg/cm}^2$. Esta tensión es el valor de la ordenada máxima en el diagrama de tensión vs. deformación. Se tendrán en cuenta las determinaciones de la EHE con prioridad.

2.2.2.2 Acero laminado. Acero A-42B

Los perfiles vendrán con su correspondiente identificación de fábrica, con señales indelebles para evitar confusiones. No presentarán grietas, curvaturas, sopladuras ni disminuciones de sección superiores al 5%.

2.2.3 Materiales auxiliares para el hormigón

2.2.3.1 *Productos para el curado del hormigón*

Se definen como productos para el curado de hormigones hidráulicos los que depositan una fina película impermeable sobre la superficie del hormigón para impedir la pérdida de agua por evaporación, aplicados en forma de pintura pulverizada.

El color de la capa protectora será preferiblemente blanco para evitar la absorción de radiación solar. Esta capa deberá ser capaz de permanecer intacta durante siete (7) días por lo menos después de una aplicación.

2.2.3.2 *Desencofrantes*

Los desencofrantes se definen como los productos que disminuyen la adherencia entre los encofrados y el hormigón en la labor de desmolde, aplicados en forma de pintura a los encofrados. El empleo de estos productos deberá ser autorizado por la Dirección de obra.

2.2.4 Encofrados y cimbras

2.2.4.1 *Encofrados en muros*

Podrán ser de madera o metálicos, pero tendrán la suficiente rigidez, latiguillos y puntales para que la deformación máxima producida al empuje del hormigón fresco sea inferior a un centímetro respecto a la superficie teórica de acabado. Para medir estas deformaciones se aplicará sobre la superficie desencofrada una regla metálica de 2 m de longitud, con la que se comprobará la posible curvatura existente.

2.2.4.2 *Encofrados de cimientos, vigas y arcos*

Podrán ser de madera o metálicos pero cumplirán la condición de que la deformación máxima de un borde encofrado sea menor o igual a un centímetro de longitud teórica. Igualmente, el encofrado deberá tener la suficiente rigidez para soportar los efectos dinámicos de la vibración del hormigón de forma que el máximo movimiento local producido por esta causa sea de cinco milímetros.

2.2.5 Aglomerantes excluyendo el cemento

2.2.5.1 *Cal hidráulica*

Ha de cumplir las siguientes características:

- Peso específico comprendido entre 2.5 y 2.8.
- Densidad aparente superior a 0.8.
- Pérdida de peso por calcinación menor al 12%.
- Fraguado entre 9 y 30 horas.
- Residuo en tamiz de 4900 mallas menor del 6%.
- Resistencia a la tracción de pasta pura a los siete días superior a 8 kg/cm².
- Resistencia a la tracción del mortero normal a los siete días superior a 4 kg/cm².
- Resistencia a la tracción de pasta pura a los 28 días superior a 8 kg/cm² y superior en 2 kg/cm² al alcanzado el séptimo día.

2.2.5.2 *Yeso negro*

Ha de cumplimentar las siguientes características:

- El contenido en sulfato de calcio semihidratado será como mínimo del 50% en peso.
- El fraguado no comenzará antes de 2 minutos y no terminará antes de media hora.
- En tamiz de 0.2 mm (UNE -7050) el residuo no será mayor del 20%.
- En tamiz de 0.08 mm (UNE-7050) el residuo no será mayor al 50%.
- Las probetas de configuración prismática (dimensiones de 4x4x16 cm) de pasta normal ensayadas a flexión con una separación de apoyos de 10.67 cm resistirán una carga central de 120 kg como mínimo.
- La resistencia a compresión determinada sobre medias probetas procedentes del ensayo a flexión será como mínimo de 75 kg/cm².

2.2.6 Materiales para fábrica

2.2.6.1 *Fábrica de ladrillos*

Los ladrillos serán de primera calidad según lo estipulado en el Código Técnico de la Edificación. Las dimensiones de los ladrillos se medirán de acuerdo con la norma UNE-7267. La resistencia a compresión de éstos será como mínimo de 100 kg/cm² para ladrillos macizos y perforados y de 50 kg/cm² para ladrillos huecos.

2.2.7 Pintura

2.2.7.1 *Pintura al temple*

Su composición se basará en una cola disuelta en agua y un pigmento mineral finamente disperso con la adición de un antifermo tipo formal para evitar la putrefacción de la cola. Los pigmentos a utilizar pueden ser: blanco de cinc (UNE-48041), litopón (UNE-48040) o dióxido de titano tipo anatasa (UNE-48044).

También podrán emplearse mezclas de estos pigmentos con carbonato cálcico y sulfato básico; estos dos últimos productos considerados como cargas no podrán entrar en una proporción mayor del 25% en peso de pigmento.

2.2.7.2 *Pintura plástica*

Como vehículo para el pintado se emplea un barniz donde los pigmentos están constituidos de dióxido de titano y colores resistentes.

2.2.8 Colores, aceites y barnices

Todas las sustancias de uso general en la pintura deberán ser de calidad suprema, teniendo los colores que reunir las siguientes condiciones: facilidad para extenderse y cubrir perfectamente grandes superficies, gran capacidad de fijación, ser inalterables a la acción de los aceites o de otros colores e insolubilidad en agua.

Los aceites y barnices reunirán a su vez las siguientes condiciones: ser inalterables por la acción del aire, conservar los colores y transparencia y color perfectos. Los colores

deberán estar bien molidos y mezclados con el aceite; asimismo deben estar bien mezclados, de manera homogénea y sin grumos.

2.2.9 Fontanería

Las bajantes, tanto de aguas pluviales como fecales, serán de fibrocemento o materiales plásticos que dispongan de autorización de uso. No se admitirán bajantes de diámetro inferior a 12 cm; todas las uniones entre tubos y piezas especiales se realizarán mediante uniones del tipo Gibault.

2.3 Condiciones para la ejecución de las obras

2.3.1 Movimiento de tierras

Consiste en el conjunto de operaciones realizadas para excavar, evacuar, llenar y nivelar el terreno, así como las zonas circundantes que puedan necesitarse, con el consecuente transporte de los materiales hasta el punto de vertido o hasta el lugar donde sean necesarios.

2.3.1.1 Ejecución de las obras

Una vez terminadas las operaciones de preparación del terreno se iniciarán las obras de excavación ajustándose a las indicaciones contenidas en los planos, tales como pendientes, dimensiones, alineaciones... La tierra vegetal que se encuentre en las excavaciones, que no se extrajo durante el clareo inicial del terreno, podrá ser empleada posteriormente en la protección de superficies que puedan sufrir erosión. En cualquier caso, la tierra vegetal excavada se mantendrá separada del resto de materiales extraídos.

Todos los materiales que se obtengan en la excavación, excepto la tierra vegetal citada, podrán ser empleados en la formación de rellenos o en cualquier otro uso contemplado dentro de este Pliego. Se transportarán una vez extraídos a las zonas destinadas para su depósito dentro del solar, o bien al vertedero si no tuvieran aplicación dentro de la obra. Durante las diversas etapas de movimiento de tierra, las obras se mantendrán en perfectas condiciones de drenaje. El material excavado no se podrá colocar de forma que suponga un peligro para las construcciones existentes, por presión directa o por sobrecarga de los rellenos contiguos.

El movimiento de tierras se abonará por m³ de material excavados medidos por la diferencia entre los datos iniciales tomados inmediatamente antes de iniciar los trabajos y los datos finales, tomados justo al finalizar. La medición se hace sobre los perfiles obtenidos durante el proceso.

2.3.1.2 Excavación de zanjas y pozos

Consiste en el conjunto de operaciones necesarias para conseguir la cimentación adecuada del terreno, sobre el que se situarán los equipos y la estructura. Su ejecución comprende las operaciones de excavación, nivelación y evacuación del terreno y el transporte de los materiales hasta su depósito. El Adjudicatario deberá notificar con la antelación suficiente el comienzo de cualquier excavación con el propósito de que se

puedan realizar las mediciones necesarias sobre el terreno inalterado. El terreno natural adyacente al de excavación no se modificará sin autorización.

La excavación continuará hasta llegar a la profundidad en la que aparezca una superficie firme. La Dirección de la Obra puede solicitar la modificación de la profundidad de excavación si a la vista de las condiciones del terreno se considere necesario para lograr una cimentación satisfactoria.

Las corrientes de aguas pluviales o subterráneas que pudiesen presentarse se taponarán o desviarán empleando el método más adecuado. Antes de proceder al vertido del hormigón y a la colocación de las armaduras, se dispondrá una capa de hormigón de 10 cm de espesor debidamente nivelada. El abono de estas excavaciones se hará en función de los m³ extraídos, calculados por diferencia de los datos iniciales y finales.

2.3.1.3 Relleno y apisonado de zanjas y pozos

Este apartado trata el vertido y posterior compactación de los materiales empleados para el relleno de las zanjas o pozos formados. Los materiales de relleno se disponen sobre la superficie en capas sucesivas de espesor uniforme; el espesor de estas tongadas será el adecuado a los medios disponibles para que se obtenga el grado de compactación exigido.

La superficie de las capas será horizontal o convexa con pendiente transversal máxima del 2%; una vez extendida, se procederá a la humidificación si se considera necesario. El contenido óptimo de humedad se determinará en la propia obra, a la vista de la maquinaria disponible y de los resultados que se obtengan en los ensayos pertinentes.

En casos especiales, donde la humedad natural del material sea excesiva para conseguir la compactación prevista, se tomarán las medidas adecuadas, como por ejemplo la adición de una mezcla de materiales secos o sustancias apropiadas como la cal. Una vez lograda la humedad requerida, se procede a la compactación mecánica de la tongada. Sobre las capas formadas se prohíbe la circulación de cualquier vehículo hasta que se complete la compactación. Al igual que en casos anteriores, el abono de estas operaciones se hará de acuerdo a los m³ de material que se depositen.

2.3.2 Hormigón

Corresponde al Adjudicatario efectuar el estudio granulométrico de los áridos, dosificación del agua y consistencia del hormigón de acuerdo con los medios de puesta en obra que se emplee en cada caso, siempre cumpliendo lo previsto en el EHE.

2.3.2.1 Fabricación de hormigón

En la fabricación y puesta en obra del hormigón deberán cumplirse los requisitos generales marcados en la EHE del Ministerio de Fomento. Los áridos, el agua y el cemento deberán dosificarse automáticamente en peso; las instalaciones de dosificación deberán ser sometidas a dicha instrucción.

Las tolerancias admisibles en la dosificación serán del 2% para el agua, el cemento y el árido. La consistencia del hormigón admitirá una tolerancia de 20 mm medidos en el cono de Abrams. La instalación de hormigonado será capaz de realizar una mezcla regular e íntima de todos los componentes proporcionando un hormigón de color y consistencia uniforme.

En la hormigonera deberá existir una placa en la que se haga constar la capacidad y la velocidad en revoluciones por minuto recomendadas por el fabricante, las cuales no deben ser superadas. Antes de introducir el cemento y los áridos en el mezclador, este se cargará con una parte de la cantidad de agua requerida, completándose la dosificación de ésta en un periodo de tiempo que no deberá ser superior a la tercera parte del tiempo de mezclado contados a partir del momento en que el cemento y los áridos entran en el mezclador. Antes de volver a cargar el equipo, se vaciará totalmente su contenido.

No se permitirá volver a amasar en ningún caso hormigón que fraguase parcialmente, aunque se añadan nuevas cantidades de cemento, áridos o agua. La mezcla en obra del hormigón se ejecutará del mismo modo que la señalada para realizar en fábrica.

2.3.2.2 Transporte de hormigón

El transporte del hormigón desde el lugar de preparación hasta la obra se hará lo más rápidamente posible. En ningún caso se tolerará el empleo en obra de hormigón que no tenga un fraguado adecuado. Cuando la fabricación de la mezcla se realiza en una instalación industrial alejada, el transporte deberá realizarse empleando camiones provistos de agitadores.

2.3.2.3 Puesta en obra del hormigón

Como norma general no debe transcurrir más de una (1) hora entre la fabricación del hormigón y su puesta en obra y compactación. No se permitirá el vertido libre del hormigón desde alturas superiores a un metro, quedando prohibido arrojarlo a gran distancia, distribuirlo con rastrillo o hacerlo avanzar más de 0.5m en los encofrados.

Al verter hormigón se debe remover eficazmente para asegurar que las armaduras queden perfectamente envueltas, cuidando especialmente los sitios en los que se reúne gran cantidad de acero y procurando que se mantengan los recubrimientos y la separación entre las armaduras. En láminas, el extendido del hormigón se ejecutará de modo que el avance se realice en todo su espesor; en vigas se realiza avanzando desde los extremos, rellenándolas en toda su altura y procurando que no se produzcan segregaciones.

2.3.2.4 Compactación del hormigón

La compactación del hormigón deberá realizarse por vibración. Los vibradores se aplicarán siempre de modo que su efecto se extienda a toda la masa, sin que se produzcan segregaciones. Si se emplean vibradores internos éstos se deben sumergir

longitudinalmente en la tongada subyacente, y retirarse también longitudinalmente sin desplazarlo hacia los lados mientras están dentro de la mezcla.

La aguja se introducirá y retirará lentamente, a velocidad constante, recomendándose que no se supere una velocidad de 10 cm/s, teniendo especial cuidado en que la aguja no entre en contacto con las armaduras. La distancia entre los puntos sucesivos de inmersión no será superior a 75 cm y será la adecuada para generar en toda la superficie de la masa una humectación brillante, siendo preferible vibrar en pocos puntos de manera prolongada; se evitará en cualquier caso la colocación de un vibrador a menos de 10 cm de la pared del encofrado.

2.3.2.5 Curado del hormigón

Durante el primer periodo de endurecimiento se someterá al hormigón a un proceso de curado según el tipo de cemento empleado y las condiciones climatológicas del lugar. En cualquier caso, deberá mantenerse la humedad del hormigón y evitarse todas las causas externas (sobrecargas o vibraciones) que puedan provocar la fisura del elemento hormigonado.

Se debe mantener húmedo durante el proceso de curado empleando arpilleras, esterillas de paja u otros tejidos durante tres días si el conglomerante utilizado fuese cemento Portland I-35, aumentándose este plazo en caso de que el cemento usado tuviese un endurecimiento más lento.

2.3.2.6 Juntas de hormigonado

Las juntas podrán ser de hormigonado (para contracción o dilatación) debiendo cumplirse lo especificado en los planos. Se tendrá en cuenta que las juntas creadas por las interrupciones en el hormigonado queden perpendiculares a la dirección de los esfuerzos críticos de compresión.

Cuando se teman efectos debidos a retracción, se dejarán juntas abiertas durante algún tiempo para que las masas contiguas puedan deformarse libremente. El ancho de estas juntas deberá ser el necesario para que puedan hormigonarse correctamente. Al retomarse los trabajos se limpiará toda la junta de suciedad o árido que quedase suelto, y se humedecerá toda la superficie sin exceso de agua, vertiéndose a continuación una lechada de cemento antes de aplicar hormigón.

2.3.2.7 Terminación de las superficies

Si no se indica lo contrario, la máxima irregularidad que puedan presentar las superficies planas medida respecto a una regla de dos metros de longitud aplicada en cualquier dirección serán las siguientes: 6 mm para superficies a la vista y 25 mm para superficies ocultas.

2.3.2.8 Limitaciones de ejecución

El hormigonado se suspenderá, por norma general, en caso de lluvias, adoptándose las medidas necesarias para impedir la entrada de lluvia en las masas de hormigón fresco o

el lavado de superficies. Si esto sucediera, se deberá picar la superficie para posteriormente humedecerla y continuar el hormigonado después de aplicar una lechada de cemento.

2.3.2.9 Medición y abono

El hormigón se medirá y abonará en base al m³ realmente depositado en obra, midiendo el volumen alojado entre las caras de las superficies. En las obras de cimentación que no requieran encofrado, se medirá el hormigón necesitado entre las caras del terreno excavado.

En el caso de que el Cuadro de Precios exprese la unidad de hormigón sobre m² (como para techos y forjados), se medirá esta cantidad en base a los metros cuadrados realmente cubiertos, incluyéndose cualquier desigualdad y/o aumento de espesor debido a cambios de la capa inferior. Si en el Cuadro se indicara que está incluido el encofrado, acero, etc... siempre se considerará la misma medición del hormigón por metro cuadrado o metro cúbico. En el precio van siempre incluidos los servicios y costes asociados al curado del hormigón.

2.3.3 Morteros

Se fabricarán los tipos de mortero especificados en las unidades de obra, indicando cuál ha de emplearse en cada caso para la correcta ejecución de las obras.

2.3.3.1 Fabricación de morteros

Los morteros se fabricarán en seco, continuándose la mezcla después de verter agua en la forma y cantidad fijada hasta obtener una pasta de aspecto homogéneo y color y consistencia uniforme.

2.3.3.2 Medición y abono

El mortero es un material auxiliar, yendo su medición incluida en las unidades a las que sirve, véase fábrica de ladrillos, pavimentos... En algún caso especial se puede medir la cantidad empleada en m³, obteniéndose su precio del correspondiente Cuadro.

2.3.4 Encofrados

Tanto las unidades como las piezas que constituyen los encofrados deberán tener la resistencia y rigidez necesarias para que en la marcha prevista del hormigonado no se originen esfuerzos anormales en el hormigón, especialmente bajo los efectos dinámicos producidos por el sistema de compactación exigido. No deben permitir los movimientos locales superiores a 5 milímetros.

Las uniones de los distintos elementos o planos de los moldes serán sólidas y sencillas, de modo que su montaje se pueda hacer con celeridad. Los moldes ya usados, y que vayan a servir en posteriores operaciones, serán cuidadosamente limpiados y revisados. Los encofrados de madera se humedecerán antes del hormigonado con el propósito de evitar la absorción del agua contenida en el hormigón y se limpiarán especialmente los fondos dejándose aberturas provisionales para facilitar esta labor.

Las juntas entre las distintas tablas del encofrado deberán permitir el hinchamiento de las mallas por la humedad del hormigón. Sin embargo, no se permitirá la salida de la mezcla durante el hormigonado a través de las juntas. Los encofrados se medirán siempre por m² de superficie en contacto con el hormigón, no siendo de abono las obras o excesos de encofrado, así como los elementos auxiliares de sujeción o apoyos necesarios para mantenerlo en una posición correcta y segura contra los esfuerzos del viento, por ejemplo. En este precio se incluyen además los desencofrantes y las operaciones de desencofrado más retirada del material.

En el caso de que en el Cuadro de Precios esté incluido el encofrado en el precio del hormigón se entiende que todos los elementos y operaciones incluidas en este concepto se incluye en su precio.

2.3.5 Armaduras

Todas las operaciones se efectuarán de acuerdo a los artículos de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE). Las armaduras de acero empleadas en el hormigón armado se abonarán en kilogramos realmente empleados, deducidos de los planos de ejecución por medición de longitudes, añadiendo las medidas de los solapes de empalme (medidos en obra) aplicando los pesos unitarios correspondientes a los diferentes elementos usados. En ningún caso se abonará más del 5% en peso, bajo el concepto de solapes, del peso medido en plano de toda la armadura.

El precio incluye la adquisición, los transportes de cualquier clase hasta el terreno, la pesada, la limpieza de armaduras y si es necesario, el doblado de las mismas, su izado, sustentación y colocación en obra incluyendo el alambre utilizado para ataduras y separadores, la pérdida por recortes y cuantas operaciones y medios auxiliares sean necesarios.

2.3.6 Albañilería

2.3.6.1 Ladrillos

Los ladrillos se colocarán según los elementos presentados en el Proyecto. Antes de emplearlos se humedecerán con agua, debiendo estar sumergidos por lo menos 10 minutos. Salvo especificaciones adicionales, el tendel debe tener un espesor de 10 milímetros. Todas las hiladas deben quedar perfectamente horizontales y con la cara buena perfectamente plana, vertical y a ras con el resto de elementos con los que debe coincidir. Para esto se hará uso de las miras necesarias, colocando la cuerda en las divisiones o marcas hechas en las miras.

Salvo indicación adicional, se empleará un mortero de 250 kg de cemento I-35 por metro cúbico de pasta. Al interrumpir el trabajo todo ha de quedar preparado para el día siguiente. Al retomar el trabajo, deberá humedecerse y picarse la superficie del mortero. Los elementos en ángulo se harán de manera que sea medio ladrillo de un muro contiguo, alternándose las filas. La medición para el abono de estos trabajos se hará por

metro cuadrado según expresa el Cuadro de Precios, descontando los huecos de las superficies.

2.3.6.2 Enfoscados de cemento

Los enfoscados de cemento se harán con cemento de 550 kg/m³ de pasta, en superficies exteriores y de 500 kg/m³ en interiores, empleándose arena de río o barranco lavada para su fabricación. En todo caso, se limpiará bien la superficie de polvo y se lavará debiendo estar húmeda antes de extender el mortero. La superficie debe estar perfectamente seca en su interior.

Si el material a cubrir es hormigón, éste se picará y mojará previamente. Preparada de este modo la superficie se aplicará con fuerza el mortero sobre una parte de ésta, evitando agregar mortero sobre otra sección ya tratada, extendiendo así una capa que debe ser uniforme a lo largo de toda la superficie. Sobre esta primera capa aplicada se extiende una segunda más suave para conseguir una elevada homogeneidad de todo el conjunto. Al comenzar una nueva operación de enfoscado es necesario que la circundante haya fraguado convenientemente. Sin embargo, sí es conveniente humedecer las juntas para lograr mayor uniformidad.

El acabado de los enfoscados debe quedar áspero para facilitar la adherencia de capas posteriores. Si las condiciones de temperatura y humedad lo requieren se humedecerán diariamente los enfoscados, bien durante la ejecución o bien después de terminada, para que el fraguado se complete en condiciones óptimas.

2.3.7 Carpintería metálica

Todas las piezas de carpintería metálica deberán ser montadas por la casa fabricante o por personal autorizado por la misma, siendo el proveedor el responsable del perfecto funcionamiento de todas y cada una de las piezas colocadas en la obra. Todos los elementos se montarán en locales cerrados y desprovistos de humedad, asentados sobre piezas de madera procurando que queden bien nivelados y que no haya ninguno que sufra de torcedura alguna. La medición se hará por metro cuadrado de carpintería, medidos entre lados exteriores.

2.3.8 Pintura

La superficie que se vaya a pintar debe estar seca, desengrasada, sin óxido ni polvo, para lo que se emplearán cepillos, chorreado con arena, ácidos y bases según convenga. Los poros y grietas se rellenarán con masilla que deje la superficie lisa y uniforme con un pigmento mineral más aceite de linaza o barniz y un cuerpo de relleno para las maderas. En los paneles se empleará yeso amasado con agua de cola y sobre los metales se utilizará rellenos compuestos del 60-70% de pigmento. Los elementos sólidos como la masilla se aplicarán con espátula mientras que los líquidos se podrán emplear con brocha o pincel o con pistola de aire comprimido. Los rellenos, una vez secos, serán lijados para conseguir un acabado homogéneo.

Las pinturas se pueden aplicar con brocha o pincel, con aerógrafo, con pistola pulverizando con aire comprimido o con rodillos. Las brochas y pinceles han de ser de pelo animal, pudiendo ser planos o redondos según sea conveniente; también se pueden emplear hechos de nylon. Los aerógrafos o pistolas constan de un recipiente que contiene pintura con aire a presión (entre 1 y 6 atm), un compresor y un pulverizador, cuyo orificio de salida varía de los 0.2 hasta los 7 mm, formándose un cono aproximado de 2 cm de diámetro máximo.

La pintura se mide y abona por m² efectuándose la medición de la siguiente manera:

- La pintura sobre muros, tabiques y techos, descontando los huecos.
- Las molduras se miden por la superficie cubierta.
- La pintura sobre carpintería metálica se medirá por las dos caras, incluyendo los tapajuntas.
- La pintura sobre las ventanas metálicas, únicamente tomándose una cara.

En los respectivos precios se incluye el costo de los materiales y las operaciones necesarias para conseguir un perfecto acabado, incluyendo la preparación, lijado, relleno... y todos los medios auxiliares que sean precisos.

2.4 Control de la obra

Los ensayos que se realicen se harán a cuenta del Adjudicatario a través de una empresa especializada. En la obra se dispondrá para la realización del control de cinta métrica, regla, nivel, plomada, termómetro, cono de Abrams, siete moldes de probetas con chapa y retacador. La toma de muestras, conservación y rotura se harán en acuerdo a lo delimitado en las normas UNE-8330084 y 8330484.

2.4.1 Componentes del hormigón

Se seguirá lo dispuesto en el artículo 63 de la Instrucción Estructural del Hormigón.

2.4.2 Hormigón

Se realizarán los ensayos previos y característicos que indica la norma EHE. Los ensayos de control se realizarán en la modalidad de control estadístico a escala normal; la definición de las partes de la obra se realizará de acuerdo con la Dirección de obra a la vista de la planificación del hormigonado, ajustándose en todo momento a lo especificado en el artículo 69 del EHE.

2.4.3 Armaduras

Se realizará el control a nivel normal.

2.4.4 Formas y disposición

No se realizará el hormigonado sin la previa autorización de la Dirección de Obra, comprobándose la disposición y diámetro de las armaduras, formas geométricas, estados de las superficies contra las que se hormigonará, etc...

2.4.5 Ensayos informativos

La Dirección de Obra se reserva el derecho a exigir al Adjudicatario ensayos informativos cuando se estime oportuno.

2.5 Instrucción del hormigón estructural

2.5.1 Cemento

Antes de empezar con el hormigonado donde se varían las condiciones de aplicación, se ensayarán pruebas físicas, mecánicas y químicas previstas en el Pliego de Prescripciones Técnicas para la recepción de cementos. Cuando el cemento esté en posición de un sello o marca de conformidad oficial no se realizarán dichos ensayos.

Cuando el cemento no disponga de la marca de conformidad oficial se comprobará por lo menos una vez cada tres meses de obra, un mínimo de tres ocasiones, y cuando lo indique la Dirección: pérdida de agua, residuo insoluble, principio y fin de fraguado, resistencia a la compresión y estabilidad de volumen.

2.5.2 Agua de amasado

Antes de empezar la obra, si no se tienen antecedentes del agua que se utilizará se varían las condiciones de aplicación, o cuando lo estime oportuno la Dirección de Obra, se realizarán los ensayos correspondientes al artículo correspondiente de la EHE.

2.5.3 Áridos

Se aplicarán los ensayos contenidos en el EHE en los artículos correspondientes a las condiciones fisicoquímicas, físico-mecánicas y granulométricos.

2.6 Condiciones de protección contra incendios en edificios

2.6.1 Condiciones técnicas exigibles a los materiales

Los materiales a utilizar en la construcción de la edificación se clasifican en función de los efectos que sufren frente al fuego de acuerdo a la norma UNE 23-727-90 (Ensayos de reacción al fuego de los materiales usados en construcción) en las clases siguientes, dispuestas por orden creciente a sus grados de inflamabilidad: M0, M1, M2, M3, M4 y M5. Los fabricantes de materiales que se empleen como revestimientos o acabados superficiales deberán acreditar su grado de inflamabilidad mediante certificados de ensayo, realizados en laboratorios oficiales y homologados para ser empleados, cuando se estime oportuno.

Aquellos materiales con tratamiento adecuado para mejorar su comportamiento ante el fuego (materiales ignífugos) serán clasificados por un laboratorio oficial y homologado, fijando un certificado o periodo de validez de ignifugación; aquellos que sean de difícil sustitución y aquellos que vayan situados en el exterior se clasifican con la clase que corresponda al material sin tratamiento ignífugo. Finalmente, los materiales cuya combustión o pirólisis produzcan la emisión de gases potencialmente tóxicos se emplearán en la forma y cantidad que reduzca su efecto nocivo en caso de incendio.

2.6.2 Condiciones técnicas exigibles a los elementos constructivos

La resistencia del material ante el fuego queda fijada por un tiempo durante el cual es capaz de mantener las condiciones de estabilidad mecánica, aislamiento térmico, estanqueidad a las llamas y ausencia de emisión de gases inflamables, excepto en el caso de las puertas para las cuales se excluye el mantenimiento de la condición de aislamiento térmico.

La comprobación de las nombradas condiciones para cada elemento constructivo se verificará mediante los ensayos descritos en las siguientes normas:

- UNE 23-093-81 de ensayo de resistencia al fuego de las estructuras y elementos de construcción.
- UNE 23-801-79 de ensayo de resistencia al fuego de la construcción de vidriados.
- UNE 23-802-79 de ensayo de resistencia al fuego de puertas y otros elementos de cierre de huecos.

Los elementos constructivos se clasifican mediante la expresión de su condición de resistentes al fuego, así como del tiempo en minutos durante el cual mantienen dicha condición. Los fabricantes de materiales específicamente destinados a proteger o aumentar la resistencia ante el fuego de los elementos constructivos demostrarán mediante certificados de ensayo las propiedades de comportamiento que figuren en la documentación.

Los fabricantes de otros elementos de construcción que hagan constar en la documentación técnica de los mismos su clasificación a efectos de resistencia ante el fuego deberán justificarlo mediante los certificados de ensayo en los que se basan; la realización de estos ensayos se llevará a cabo en laboratorios homologados y autorizados por la Administración del Estado.

3. Instalación eléctrica

3.1 Generalidades

Los materiales y ejecución de la instalación eléctrica cumplirán lo establecido en el Reglamento Electrotécnico para Alta Tensión (RAT) y en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (RBT) e instrucciones técnicas complementarias ITC MI.BT. Del mismo modo se adoptarán las diferentes condiciones previstas en las normas:

- NTE-IEP “Instalaciones de electricidad. Puesta a tierra”.
- NTE-IEP “Instalaciones de electricidad. Baja tensión”.
- NTE-IEP “Instalaciones de electricidad. Alumbrado interior”.
- NTE-IEP “Instalaciones de electricidad. Alumbrado exterior”.
- NTE-IEP “Instalaciones de electricidad. Red exterior”.

Se deben considerar no obstante los Reglamentos locales. Además, con carácter general se aplicarán las normas UNE en los equipos y materiales a los que se puedan aplicar. En

la hipótesis de diferentes calidades o interpretaciones de los distintos reglamentos y normas aplicables prevalecerá la decisión de la Dirección de obra. Todos los equipos y materiales eléctricos se instalarán de acuerdo con las normas de los fabricantes.

3.2 Identificación

Todos los conductos serán identificados al comienzo y al final del recorrido mediante accesorios tipo UNEX o similar, en material no corrosivo.

3.3 Conductores

Las bobinas y rollos de cable se protegerán de todo daño posible durante la obra. No se introducirán los conductores en los conductos antes de que estos estén perfectamente colocados en su sitio y haya sido previamente comprobado que no existe ninguna obstrucción en su interior.

Los conductores serán tratados con todo cuidado durante la obra para evitar la chance de dañarlos. Se tomarán las medidas necesarias para que los cables no estén sometidos a tensiones excesivas durante su instalación. En cualquier caso, los radios de curvatura de los cables siempre serán superiores a diez (10) veces el diámetro.

Los cables se protegerán de posibles daños mecánicos elevándolos 2.5 metros del nivel del suelo y alojándolos en el interior de tubos de protección o bien en una bandeja con tapa de protección. No se tenderán más de dos capas de cables en las bandejas dispuestas horizontalmente y cuando estén en vertical solamente se instalará una capa. Cuando varios conductores vayan juntos en un conducto, se introducirán al mismo tiempo.

Todos los conductores que se empleen serán de cobre y han de cumplimentar las normas UNE 20003, UNE 21022 y UNE 21064. Su aislamiento y cubierta serán de policloruro de vinilo y deberá cumplir la norma UNE 21029. El Adjudicatario informará por escrito al Ingeniero Director de la obra el nombre del fabricante de los conductores y le enviará una muestra de los mismos. Si el fabricante no reúne la suficiente garantía a juicio del Ingeniero Director, antes de instalar el molde se comprobarán las características en un laboratorio oficial; no se admitirán cables que presenten desperfectos superficiales o que no vayan en las bobinas de origen en las que deberá figurar el nombre del fabricante, tipo de cable y sección. Asimismo, queda terminante prohibido el empleo de materiales de procedencia distinta en un mismo circuito.

3.4 Terminales

Se emplearán terminales de precisión para la conexión de los conductores a los equipos y barras de distribución.

3.5 Instalación de aparatos

Todos los aparatos se instalarán en donde se muestran los planos, quedando completamente preparados para funcionar. El Adjudicatario de la instalación deberá poseer las instrucciones de los diferentes fabricantes de los equipos y seguirlas

ordenadamente. Cuando los equipos vayan sobre paredes, techos o estructuras, el Adjudicatario realizará todo el trabajo necesario para su fijación.

3.6 Cuadros de distribución

Los cuadros serán nivelados y alineados perfectamente en su sitio utilizando calzos si fuere preciso. Antes de entrar en funcionamiento serán repasadas todas las conexiones y la tornillería y se limpiarán perfectamente todos los aislantes. El Adjudicatario realizará todas las conexiones interiores y exteriores que se requieran, que serán de aleación ligera o PVC con índice de protección IP55. Cada caja será identificada con una placa de plástico o baquelita de color negro en el lateral más visible.

3.7 Instalaciones de fuerza y alumbrado

El Adjudicatario realizará las conexiones en cajas, aparatos, etc... y serán instalados completamente, incluyendo lámparas, difusores, reactancias... y todos aquellos accesorios que formen parte del montaje.

En la sala de control de la planta se dispondrá una iluminación a base de luminarias estancas con tubos fluorescentes de 36 W. Esta sala tendrá dos circuitos de acceso empleando interruptores unipolares de 16 A (50% de luminarias cada uno). Para la sala de equipos y el almacén también se usarán tubos de 36 W. Las lámparas se instalarán una vez que estén perfectamente colocados los aparatos de alumbrado de acuerdo con los planos e instrucciones del fabricante. Las cajas de mecanismos no se instalarán hasta conocerse perfectamente el acabado de las paredes en donde ha de guardarse y no se permitirá el tránsito de conductores hasta que estén bien tomadas.

3.8 Equilibrio de fases

Se realizarán las conexiones de receptores de tal modo que el desequilibrio de fases no exceda el 10%.

3.9 Acometida general

El cable cumplirá la normativa particular de la empresa suministradora de energía. Los conductores estarán aislados para una tensión nominal de 1000 V del tipo UNE DV-0.6/1 kV y sección de 35 mm².

3.10 Caja de protección

Estará construida en material aislante, autoextinguible según norma UNE 20234 y será de grado de protección 417 como indica la norma UNE 20305. Será del tipo CGPH de 250 A y contendrá cartuchos y fusibles calibrados de 250 A y neutro seleccionable.

3.11 Línea de reparto

De tipo UNE DV-0.6/1 kV alojada en el interior de una canalización en tubo aislante de PVC, autoextinguible. Los diámetros de conductor y canalización se fijan en los planos correspondientes.

3.12 Contadores

Los módulos serán de material aislante, autoextinguible y de estabilidad térmica de clase A proporcionado un grado de protección 413 de acuerdo con la norma UNE 20324. Serán accesibles por medio de tapa transparente y precintable, de las mismas características que los módulos.

3.13 Derivaciones individuales

Los conductores serán rígidos de cobre y se instalarán en el interior de tubos recios de PVC de acuerdo con la norma MI-BT-019. Los diámetros de conductores y tubos se fijarán en los planos correspondientes, donde cada derivación contendrá las fases, neutro y conductor de protección a tierra. Las cajas de derivación serán aislantes, con tope del mismo material, ajustable a presión o con tornillos y estarán dotadas de huellas de ruptura para el peso de tubos.

3.14 Instalación

Los mecanismos, cajas de derivación y pantallas serán de tipo estanco con protección IP-4 contra chorro de agua. La instalación será de superficie y los conductores irán por el interior de tubos rígidos de PVC con diámetros que se muestran en los planos correspondientes.

3.15 Instalación de puesta a tierra

Se realizará por medio de electrodos de tierra de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro de cobre con alma de acero; el conductor de unión de las picas será de cobre de sección de 35 mm² de acuerdo con la Instrucción MI-BT-039. Los portes metálicos de los soportes se unirán a dicho conductor mediante soldadura autógeno. La línea de enlace de la red con tierra será de la misma sección, que enlazará con la línea principal de tierra de 16 mm².

3.16 Inspecciones, pruebas y recepciones

El Adjudicatario realizará todas las pruebas y ensayos de circuitos y equipos, así como aquellas que le sean requeridas por parte de la Propiedad, proporcionando la mano de obra y medios necesarios de acuerdo con lo indicado en el presente documento.

En general, se incluyen pruebas para retener la garantía de los fabricantes, pruebas de aislamiento fase-fase y fase-tierra de todos los cables, nivel de aislamiento, pruebas de continuidad y medida de la resistencia de la red de tierra y tensiones de paso y contacto, comprobación de polaridades y secuencia de fases, comprobación nocturna del sistema de alumbrado y certificación de todas las pruebas.

En particular, las pruebas de cables se realizarán inmediatamente después de que estos sean tendidos y antes de efectuar la conexión. El cableado será comprobado en cuanto a la correcta identificación, continuidad y resistencia de aislamiento entre conductores y entre estos a tierra, con el propósito de cumplir los reglamentos aplicables.

4. Instalaciones mecánicas

4.1 General

Las prestaciones del Adjudicatario requeridas en esta especificación comprenden los siguientes conceptos:

- Suministro de todos los equipos, con aportación del material de fijación, abarcones, tornillería, juntas y todos los accesorios necesarios para el correcto montaje y funcionamiento, incluso cuando no estuviesen especificados. También provisión de todos los elementos necesarios para realizar el movimiento de materiales en obra, grúas, andamios, elementos de acceso y protección...
- Pintado e identificación según norma UNE 1063 de todos los tramos de tubería y de sus correspondientes soportes y accesorios.
- Testeo de presión y estanqueidad.
- Revisión y puesta en servicio.
- Confección de los esbozos de detalles constructivos y de montaje necesarios, que serán sometidos a la aprobación de la Dirección de obra antes de su ejecución.
- Confección del Proyecto *as built* de todos los tramos, incluyendo perspectivas isométricas, plantas y detalles.
- Tramitación de los permisos necesarios aportando la documentación precisa.

Para la elaboración de la oferta el Adjudicatario está en la obligación de:

- Considerar todo aquello necesario para la elaboración de la instalación aunque no se encuentre especificado en detalle.
- Valorar el grado de dificultad de montaje de las distintas redes prediciendo todo tipo de equipos necesarios para su ejecución.
- Identificar in situ el lugar de la obra con el propósito de tener en cuenta en su oferta todo aquello que considere necesario para el desarrollo de la misma.
- Atenerse a las normas de seguridad e higiene en el trabajo respetando en todo momento las indicaciones que estime oportunas la Propiedad.
- Tomar en consideración que el área que se adjudique dentro de los terrenos para el almacenamiento de materiales, oficinas y servicios será de su entera responsabilidad, tanto en cuanto a los materiales allí almacenados como a efectos personales y de documentación.
- Las casetas de obra para el personal y herramientas estarán de su cuenta y deberán ser retiradas al finalizar los trabajos referidos en la oferta realizada.

4.2 Materiales

Las especificaciones de los materiales objeto de este Pliego de Condiciones Particulares, salvo indicación contraria en los planos, serán las indicadas a continuación.

4.2.1 Accesorios

Los accesorios, codos, reducciones, etc..., serán según la norma DIN correspondiente, teniendo en cuenta las necesidades de trazado en cada caso. Las juntas serán de los siguientes espesores mínimos y materiales:

- Teflón: hasta 2.5 pulgadas.
- Para 2 mm de metal o plástico: de 2.5 a 4 pulgadas.
- Para 3 mm de metal o plástico: de 4 a 12 pulgadas.
- Para 4 mm de metal o plástico: superior a 12 pulgadas.

4.2.2 Soportes

Podrán emplearse soportes normalizados de fabricación estándar cuando las condiciones de montaje lo permitan. En los demás casos los soportes se construirán in situ empleando perfiles angulares (mínimo 60x60x6 mm) o bien perfiles de doble T de ala ancha.

Las tuberías aéreas o en galerías se soportarán como máximo cada 8 m para diámetros superiores a 6 pulgadas y cada 4 m para los demás diámetros, debiéndose prever soportes intermedios adecuados si fuesen necesarios. Los abarcones para la sujeción de tuberías no sometidas a esfuerzos térmicos serán de hasta 4 pulgadas de diámetro, con redondo de acero al carbono y puntas roscadas sobre tuerca según DIN-3570. Para diámetros mayores a 4 pulgadas se usará pletina de acero al carbono a la que se soldarán espárragos de varilla roscada con doble tuerca para su amarre al soporte, según DIN-1593.

4.2.3 Recipientes a presión

Los recipientes a presión cumplirán con el Reglamento de Aparatos a Presión, tanto en su dimensionamiento como en su montaje y operación.

4.3 Condiciones de ejecución

4.3.1 Tuberías y accesorios

4.3.1.1 Uniones

Las uniones de tuberías se realizarán mediante soldadura a tope o a rosca cilíndrica, según se estipule. Los accesorios, codos, té, reducciones, etc..., se unirán también por medio de soldadura a tope. Las conexiones a válvulas se harán con bridas de cuello según normas ANSI, que también regirán las uniones de montaje y desmontaje.

No se admitirá calentamiento de la tubería que sirva para remediar sobre otros efectos de alineación. La longitud de los tubos suministrados será como mínimo de 8 m y la longitud media será superior a 9 m. No se admitirán grietas, abolladuras, rayas o corrosiones que puedan atacar la resistencia mecánica del tubo ni asperezas o escamas internas visibles susceptibles de atacar la resistencia del tubo durante explotación.

Todos los codos, té, válvulas..., deberán estar colocados de forma que se puedan desmontar. En todos los puntos se podrán apretar o soldar los tornillos con facilidad. En

los lugares en que se coloquen codos o té, se sujetarán a ambos lados de manera que no puedan ser expulsados.

4.3.1.2 Interferencias de trazado

Para salvar cruzamientos de tuberías de la misma altura no deberá formarse codos hacia arriba salvo que no quede otro remedio. Cuando se tengan que poner dos o más codos en un tramo de manera que eviten puntos de acumulación de aire se instalará en ellos un purgador automático.

4.3.1.3 Curvado

Toda tubería de diámetro inferior a 1.5 pulgadas irá doblada a frío respetando la sección circular a lo largo del desarrollo curvado. Para tuberías de diámetro mayor irán mediante curvas de tipo N-3D en consonancia a lo mostrado en la norma DIN 2605. Los tubos doblados tendrán un radio de curvatura constante en todos los puntos, estando exentos de pliegues, deformación y variaciones de espesor.

4.3.1.4 Soldadura

La soldadura de los tubos está prevista a tope. El material necesario para la soldadura al arco correrá a cuenta del Adjudicatario. Para la ejecución de las soldaduras se exigirá la limpieza interior del tubo metálico por caso de una escobilla. Sus extremidades calibradas serán verificadas con la ayuda de un tapón calibrado. El tubo será alineado de forma que su eje se confunda con el precedente y las extremidades a soldar conserven su puesto durante el puenteo con la ayuda de un dispositivo apropiado. Con preferencia, ese dispositivo será introducido en el tubo y deberá impedir la ovalización del tubo por expansión de este último. No será tolerada ninguna desnivelización de los bordes por encima de 1.2 milímetros.

El juego entre los tubos deberá ser tal que en la ejecución de la soldadura la fusión del metal de base afecte a todo el espesor de su pared. Los accesos de soldadura serán librados de toda traza de cuerpos de origen mineral u orgánico. Sin embargo, ninguna gota de soldadura será tolerada en el interior del tubo. La penetración de la soldadura será regular, al contrario de las juntas, de débil volumen y su espesor será tal que la suma de su valor y del de la desnivelización eventual de los bordes no exceda 1.6 metros. El cordón de metal depositado no llevará huecos o surcos laterales.

Los soldadores que intervengan en los trabajos deberán presentar certificados de homologación y calificación otorgados por la Autoridad competente. La calificación de los soldadores y la recepción por radiografía de las soldaduras se realiza según lo indicado a continuación:

- Falta de penetración: junta soldada no interesando la totalidad del espesor de la pared del tubo. Una longitud máxima de 25 mm de soldadura no penetrada no será admitida más que cuando esté comprendida entre dos cordones reconocidos sin defecto de 150 mm de longitud unitaria.

- Falta de fusión : junta soldada por la cual el metal de base del tubo no ha sido fundido. Una longitud máxima de 25 mm de soldadura no fundida no será admitida más que cuando esté comprendida entre dos cordones reconocidos sin defecto de 150 mm de longitud unitaria.
- Sopladuras: una longitud máxima acumulada de 25 mm por 100 mm de cordón no será admitida más que si el cordón es reparado por 300 mm de soldadura sin defecto.
- Inclusiones gaseosas.
- Inclusiones de escorias: igual que sopladuras.
- Inclusiones alineadas de escorias: la línea de escoria no podrá tener una longitud mayor de 50 mm y un espesor máximo de 1.5 mm, a no ser que el cordón afectado esté comprendido entre dos sopladuras reconocidas sin defecto de 300 mm de longitud mínima unitaria.
- Canales o surcos laterales: un canal continuo de 0.4 mm no podrá ser tolerado más que si la longitud es superior a 25 milímetros.
- Cráteres en la superficie del cordón: su profundidad ha de ser inferior a 0.01 milímetros.
- Sobredimensionamiento exterior del cordón: comprendido entre 1 y 3 milímetros.
- Penetración y falta de alineación: el espesor de estos dos defectos acumulados será inferior a 1.6 milímetros.
- Fisuras: prohibidas.

Los defectos mencionados podrán acumularse sobre una longitud máxima de 50 mm a condición de que esta acumulación esté comprendida entre dos soldaduras sin defecto, teniendo una longitud mínima de 300 milímetros. En ningún caso la longitud total de las combinaciones de defectos podrá exceder del 10% de la longitud de cordón soldado. En cuanto a la identificación de soldaduras el Adjudicatario tendrá un cuaderno de soldadura (por duplicado) en el que se indicará:

- El número de soldadura, ya que un mismo número no podrá designar dos soldaduras diferentes.
- El número de fabricación de los tubos.
- El marcado de las soldaduras con relación a marcas bien determinadas.
- El indicativo del soldador que ha ejecutado la soldadura.
- Las características de los electrodos empleados.
- La fecha de ejecución.
- La fecha de examen grammagráfico.
- El indicativo del controlador.
- La fecha y resultados de los ensayos grammagráficos.

- Las longitudes exactas de los elementos tubulares derechos y acortados entre dos soldaduras.

Toda soldadura reconocida defectuosa al examen o a la prueba de estanqueidad indicada más adelante será reparada por cuenta del Adjudicatario. La reparación se efectuará bien por repetición local del defecto bien por reemplazamiento completo de la soldadura defectuosa. Cuando la repetición local afecte a la primera pasada (pasada de fondo) serán tomadas todas las precauciones para que la penetración responda a las especificaciones anteriormente citadas.

El reemplazamiento completo de la soldadura definitiva será efectuado por soldadura de un cordón, reemplazando la soldadura quitada. Cada soldadura sustituida, localmente o en su totalidad, será registrada en el “cuaderno de soldaduras”, siguiendo las especificaciones citadas, más en el caso de una intervención localizada se hará constar también la longitud del cordón reparado y del modo de ejecución.

4.3.1.5 Pruebas de estanqueidad y presión

Una vez terminada de montar una red de un fluido se procederá a verificar la misma, comprobando el apriete de los tornillos de bridas, que existan todos los tornillos en las bridas y que existan juntas entre ellas. En las uniones roscadas se comprobará la junta de unión con cinta de teflón. En las válvulas se comprobará su posición correcta, abierta o cerrada según los casos.

Realizada la comprobación anterior se realizará la prueba de estanqueidad, utilizando para ello agua a temperatura ambiente y a la presión de trabajo durante un periodo de veinticuatro (24) horas. Las pruebas de presión de las tuberías deberán efectuarse durante 60 minutos a 1.5 veces la presión normal de trabajo para lo cual el Adjudicatario deberá prever los elementos necesarios.

Todos los gastos ocasionados por las citadas pruebas correrán por cuenta del Adjudicatario, así como las correcciones que se deban efectuar hasta conseguir los resultados requeridos.

4.3.2 Soportes y estructuras

En este apartado se establecen las condiciones técnicas requeridas para el suministro y montaje de los soportes necesarios para las tuberías objetivo de la especificación.

4.3.2.1 Diseño de materiales y fabricación

Los materiales a utilizar serán los indicados en los planos. Todos los materiales de chapa a emplear por el suministrados deberán venir avalados por certificados de calidad de la siderúrgica. Los perfiles laminados bastarán con que lleven la marca de calidad impresa en el relieve de laminación.

Todos los materiales de aportación de soldadura vendrán avalados por sus certificados de calidad. Este material será controlado durante los procesos de fabricación y reparación de elementos para comprobar que el material usado es el especificado. Las

tolerancias dimensionales de los productos laminados serán los indicados en la norma UNE 36080.

4.3.2.2 Uniones soldadas

El instalador será totalmente responsable de que el trabajo, tanto mano de obra como ejecución, cumpla las especificaciones. Todas las soldaduras se efectuarán por alguno de los siguientes procedimientos:

- Arco manual con electrodo revestido.
- Semiautomática con protección de dióxido de carbono o gas inerte con electrodo macizo.
- Automática con arco sumergido.

El instalador entregará para su aprobación los procedimientos de soldadura a emplear, en los que figurará como mínimo:

- Preparación de bordes.
- Posición.
- Proceso empleado, con indicación de parámetros.
- Características del metal de aportación.
- Secuencia y número de pasadas.
- Temperaturas de precalentamiento y método.
- Tratamiento térmico final, si aplica.

Las características mecánicas del metal depositado serán como mínimo las indicadas para el material base. No se permitirá la realización de ninguna soldadura a soldadores no homologados, incluso provisionales.

4.4 Pinturas y aislamiento

Las tuberías se limpiarán en base a chorreado de arena, grado 2 Sa^{0.5}. Las tuberías de acero al carbono se tratarán según se indica:

- Limpieza: la superficie exterior de las tuberías se limpiará a base de raspado, cepillado manual con cepillo de acero para dejar la superficie en un grado de acabado correspondiente a St-2 de la norma SIS 055-900.
- Imprimación: una vez limpia la tubería según el procedimiento indicado anteriormente e inmediatamente después se le dará a esta una capa de imprimación de un espesor mínimo de 40 micras de película seca.
- Acabado: a base de dos manos de pintura acrílica, siendo ambas manos de diferentes tonos y con un espesor de 35 micras de película seca cada una.

La señalización de tuberías será según norma UNE 1063. Las tuberías enterradas en arena lavada se protegerán previo chorreado según grado Sa 2^{0.5} con capa de imprimación de un espesor mínimo de 40 micras de película y doble encintado. Para las

tuberías enterradas en hormigón se realizará únicamente un chorreado según grado Sa 2^{0.5}.

Las tuberías que sean calorifugadas dispondrán de diferentes espesores de aislamiento en función de los diámetros, según lo especificado. El acabado exterior será mediante envolvente de chapa de aluminio de 0.8 mm de espesor debidamente curvada, soplada, baldonada en sus extremos y fijada mediante tornillos. En los codos o curvas la chapa irá en segmentos independientes, engatillados y atornillados entre sí.

4.4.1 Soportes

Los soportes se tratarán según se indica: limpieza a chorreado de arena, imprimación anticorrosiva con un espesor no inferior a 40 micras y una capa de fondo al clorocaucho de alto espesor (80 micras) y un acabado a base de dos manos de pintura acrílica, siendo ambas de diferentes tonos y con un espesor mínimos de 50 micras cada una. El color y los tonos se elegirán de acuerdo con la Propiedad.

4.5 Control de calidad. Inspección y pruebas

4.5.1 Requisitos generales

El Adjudicatario realizará y mantendrá un Plan de Control de Calidad. Además, controlará los documentos, procedimientos e informes relacionados con las calidades de los equipos. La Propiedad o su representante tendrán accesibilidad a estos documentos, procedimientos e informes cuando así lo requiera.

El Adjudicatario identificará, documentará y notificará a la Propiedad todos los incumplimientos o desviaciones de los requisitos de esta especificación. Al final de los trabajos se entregará a la Propiedad la documentación generada en los trabajos.

4.5.2 Pruebas y ensayos de tuberías

4.5.2.1 Ensayos no destructivos

El Adjudicatario será el responsable de todos los exámenes no destructivos y pruebas de tuberías suministradas bajo esta especificación. La Propiedad tendrá autoridad para detener el trabajo o retener el envío si los requisitos de la especificación, incluyendo aquellos referentes a la documentación, no han sido cumplidos. Todos los exámenes no destructivos serán realizados por personal cualificado.

La tubería igual o superior a 2 pulgadas será radiografiada en su soldadura en un 5%. Si el índice de rechazo fuera superior al 10% de las soldaduras inspeccionados se supervisará el 100%. Además serán también radiografiadas las soldaduras que estando incluidas en líneas con prueba de presión no puedan ser sometidas a ella.

En las soldaduras que no van a ser examinadas volumétricamente y cuya ejecución se realice saneando de raíz, se controlará el correcto saneado por medio de un examen de líquidos penetrantes. Todas las reparaciones por soldaduras serán examinadas por líquidos penetrantes o partículas magnéticas. Las reparaciones importantes en tuberías

serán radiografiadas. En aquellas soldaduras que no se realicen radiografías se aplicará la inspección por líquidos penetrantes.

Los procedimientos de examen radiográfico estarán de acuerdo con el código ASME sección V. La interpretación final de la película y la aceptación o rechazo de la película y las soldaduras será efectuada por la Propiedad. El Adjudicatario inspeccionará y aceptará la película y las soldaduras antes de someterlas a supervisión de la Propiedad. La densidad aceptable de la película a través del metal de soldadura será de 2.0 a 3.8 para revisión sencilla. Se utilizará la técnica radiografiada de visión sencilla película doble.

Para la radiografía de tuberías se colocará un cinturón numerado sobre la tubería para localizar sus defectos. El cinturón constará de números de plomo de 6.4 y 12.7 mm de alto e irán espaciados exactamente 24.5 mm para los tamaños de tubería de 2.5 a 8 pulgadas. El cinturón empezará con 0 y circundará la tubería. La dirección de los números quedará permanentemente identificada sobre la tubería. No se efectuarán agujeros en las tuberías para las radiografías sin la aprobación por escrito de la Propiedad.

Los procedimientos de examen por líquidos penetrantes estarán de acuerdo con el código ASME. No se permitirá el uso de líquidos penetrantes eliminables por agua. Se realizará un mínimo de cuatro mediciones de grosor de la pared, distanciadas entre sí a 90° sobre los extremos de todas las tuberías y accesorios o según lo requiera la Propiedad cuando el espesor de la pared se especifique por la pared mínima de la Lista de Línea. La aceptación de la tubería y accesorios se basará en la pared mínima especificada más tolerancia de medición; las mediciones de espesor y su situación se reflejarán en su informe y una copia del mismo será enviada a la Propiedad para su aprobación.

4.5.3 Pruebas hidrostáticas

Después de la instalación todos los conjuntos fabricados serán sometidos a una prueba hidrostática de acuerdo con el código ASME. El Adjudicatario garantizará su trabajo como capaz de resistir dicha prueba.

4.5.3.1 Inspección y prueba en soporte

El Adjudicatario realizará la inspección de las soldaduras de acuerdo con la presente especificación, cuyo alcance será el indicado en el apartado. Las soldaduras se inspeccionarán visualmente al 100%. Además, se inspeccionarán mediante muestreo el 5% con líquidos penetrantes o, como alternativa, partículas magnéticas.

Cuando la inspección mediante muestreo detecte que la soldadura correspondiente no cumple los requisitos de calidad mínimos, se efectuará una inspección de una muestra adicional del 10% mediante radiografiado. Esta muestra a examinar adicionalmente será la seleccionada por la Propiedad.

Si la inspección adicional revela que la soldadura cumple los requisitos mínimos de calidad de esta especificación, se repararán los defectos anteriormente detectados y se considerarán aceptables las soldaduras. Si la muestra adicional examinada revela que la soldadura no cumple con los requisitos mínimos de calidad de esta especificación se inspeccionará totalmente el resto de soldaduras mediante radiografiado, y la soldadura que no cumpla con las normas de aceptación será eliminada, soldada e inspeccionada de nuevo.

El procedimiento de examen radiográfico se efectuará de acuerdo con el artículo 2º de la subsección A, sección V del código ASME y empleando la técnica radiográfica especificada en la SE-94. La densidad de la película deberá estar de acuerdo con lo indicado en el subartículo 234 de la sección V del código ASME, siendo inaceptables los siguientes defectos:

- Toda grieta, falta de fusión o falta de penetración, cualquiera que sea su longitud.
- Toda porosidad por encima de la aceptada en el apéndice IV sección VIII del código ASME.
- Todo grupo de indicaciones en línea cuya suma de longitudes sea mayor que T en una longitud 12T y la distancia entre dos indicaciones contiguas sea menor de 6L, siendo T el espesor de la soldadura y L la longitud más larga del grupo.

El procedimiento de inspección con líquidos penetrantes se hará de acuerdo con el artículo 6º de la sección V del código ASME siguiendo las recomendaciones del fabricante de los líquidos penetrantes empleados en la inspección, siendo inaceptables los siguientes defectos:

- Indicaciones redondas de tamaño superior a 5 milímetros.
- Toda grieta, cualquiera que sea su longitud.
- Cuatro o más indicaciones redondas en línea, separadas entre sí menos de 1.5 mm de borde a borde.
- Toda indicación lineal cuya longitud sea mayor de 1.5 milímetros.

El procedimiento de inspección con partículas magnéticas se hará de acuerdo con el artículo 7º de la sección V del código ASME empleando el método más idóneo según la geometría de la pieza. Los criterios de aceptación serán los mismos que en el caso de inspección con líquidos penetrantes.

Finalmente, en el procedimiento de inspección visual se considerarán defectuosos y deberán ser reparados mediante esmerilado los cordones de soldadura a tope que presenten sobreespesores superiores a los indicadores:

- Espesor de la chapa, hasta 25 milímetros.
- Máximo sobreespesor de 2.4 milímetros.

Asimismo deberán ser reparados los cordones de soldaduras que presenten mordeduras de profundidad superior a 0.8 milímetros.

4.5.3.2 Reparación de soldaduras

En caso de duda sobre la bondad de una soldadura, la Propiedad podrá realizar por su cuenta inspecciones de nivel superior. Si dichas inspecciones demostrasen que las soldaduras son inaceptables, el costo de las mismas y su reparación serán por cuenta del Adjudicatario. Todas las reparaciones de soldadura se efectuarán de acuerdo con los procedimientos aprobados y se supervisarán según los métodos especificados.

4.5.4 Control dimensional

En caso de duda sobre la bondad de una soldadura la Propiedad podrá realizar por su cuenta inspecciones de nivel superior. Si dichas inspecciones demostrasen que las soldaduras son inaceptables, el costo de las mismas y su reparación serán por cuenta del Adjudicatario. Todas las reparaciones de soldadura se efectuarán de acuerdo con los procedimientos aprobados y se supervisarán según los métodos especificados.

5. Documentación

Todos los documentos requeridos a lo largo del actual Pliego de Condiciones forman parte inseparable del Proyecto. Todos han de ser aportados en castellano y adoptarán el Sistema Internacional de unidades. Formarán parte de este apartado, como mínimo, los siguientes documentos:

- Modificación o complemento a los proyectos existentes para permisos oficiales de Unión Eléctrica Fenosa y Delegación de Industria para la instalación de Baja Tensión y demás elementos de la instalación eléctrica.
- Planos de disposición, que representarán los equipos en detalle y perfectamente acotados.
- Plano de detalle de montaje, que representarán todos los detalles necesarios para la correcta ejecución del montaje de los equipos.
- Lista de materiales, que deberá reflejar todos los datos necesarios sobre las diferentes partes del equipo susceptibles de ser repuestas.
- Lista de planos, consistirá en una relación del conjunto de planos, número de hojas, título y número de la última revisión.
- Instrucciones de montaje.
- Instrucciones de servicio.
- Instrucciones de mantenimiento.

6. Equipos

6.1 Lista de equipos

La instalación implantada para la producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de bioetanol abarca los equipos incluidos en la tabla 1.

Tabla 1: Lista de equipos en la planta de producción de acetato de etilo

Nomenclatura	Equipamiento
SECCIÓN 100	
P-101 A/B	Bomba centrífuga alimentación
E-101	Intercambiador de calor C&T
E-102	Evaporador tipo <i>kettle</i>
E-103	Intercambiador de calor C&T
SECCIÓN 200	
R-201	Reactor catalítico heterogéneo
E-201	Intercambiador S&T circuito Dowtherm
SECCIÓN 300	
K-301	Compresor reciprocante
E-301	Condensador parcial previo a flash
V-301	Tanque flash aislamiento H ₂
SECCIÓN 400	
T-401	Columna de destilación azeotrópica
V-401	Tambor flash separación líquido iónico
E-401	Condensador previo a separación
P-401 A/B	Bomba centrífuga previa T-402
T-402	Torre de purificación de reciclo
T-403	Torre de purificación de producto
P-402 A/B	Bomba centrífuga circuito líquido iónico
P-403 A/B	Bomba centrífuga línea de reciclo
P-404 A/B	Bomba centrífuga línea de producto

6.2 Especificaciones de los equipos

En este apartado se incluyen las especificaciones de los equipos presentados en la Tabla 1.

Tabla 2: Especificaciones básicas de diseño bombas centrífugas P-101 A/B

Parámetro	Valor
Presión de entrada (Pa)	100 000
Presión de salida (Pa)	2 000 000
ΔP (Pa)	1 900 000
ρ (kg/m ³)	791.8
W (J/kg)	2399.6
Caudal de operación (kg/s)	2.92
N _{útil} (kW)	7.01
Eficiencia de impulsión (%)	75
N _{freno} (kW)	9.36

Tabla 3: Especificaciones básicas diseño intercambiador de calor E-101

Parámetro	Valor
Caudal de fluido de operación (kg/h)	2.92
Temperatura de entrada fluido (K)	298.15
Temperatura de salida fluido (K)	452.85
Calor específico medio fluido operación (kJ/kg °C)	4.01
Utilidad	mps
Temperatura de entrada de la utilidad (°C)	473.15
Temperatura de salida de la utilidad (°C)	473.15
Calor intercambiado (kW)	1815.22
Entalpía vaporización utilidad (kJ/kg)	1938.6
Caudal de vapor necesario (kg/s)	0.94
Coefficiente integral de transmisión de calor (kW/m ² K)	0.75
Diferencia de temperaturas media logarítmica (K)	71.81
Área de intercambio de calor (m ²)	33.7

Tabla 4: Especificaciones básicas de diseño evaporador kettle E-102

Parámetro	Valor
Caudal de fluido de operación (kg/h)	2.92
Temperatura de entrada fluido (°C)	452.85
Temperatura de salida fluido (°C)	452.85
Calor vaporización fluido operación (kJ/kg)	604.80
Utilidad	mps
Temperatura de entrada de la utilidad (K)	473.15
Temperatura de salida de la utilidad (K)	473.15
Calor intercambiado (kW)	1768.62
Entalpía vaporización utilidad (kJ/kg)	1938.6
Caudal de vapor necesario (kg/s)	0.912
Coeficiente integral de transmisión de calor (kW/m ² K)	1.2
Diferencia de temperaturas media logarítmica (K)	20.3
Área de intercambio de calor (m ²)	72.6

Tabla 5: Especificaciones básicas de diseño intercambiador de calor E-103

Parámetro	Valor
Caudal de fluido de operación (kg/h)	2.92
Temperatura de entrada fluido (K)	452.85
Temperatura de salida fluido (K)	493.15
Calor específico medio fluido operación (kJ/kg °C)	2.09
Utilidad	hps
Temperatura de entrada de la utilidad (K)	523.15
Temperatura de salida de la utilidad (K)	523.15
Calor intercambiado (kW)	246.76
Entalpía vaporización utilidad (kJ/kg)	1714.7
Caudal de vapor necesario (kg/s)	0.15
Coeficiente integral de transmisión de calor (kW/m ² K)	1.1
Diferencia de temperaturas media logarítmica	47.32
Área de intercambio de calor (m ²)	4.8

Tabla 6: Especificaciones de diseño riguroso del reactor catalítico heterogéneo R-201

Parámetro	Valor
Masa de catalizador (kg)	13 000
Densidad lecho empacado (kg/m ³)	950
Porosidad lecho catalítico	0.4
Volumen gránulos catalizador (m ³)	13.68
Densidad mezcla de reacción inicial (kg/m ³)	22.46
Densidad mezcla de reacción final (kg/m ³)	17.04
Diámetro interno tubos (m)	0.0779
Diámetro externo tubos (m)	0.0889
Longitud estandarizada tubos (m)	12
Número de tubos	240
Velocidad mezcla reaccionante por tubos (m/s)	0.13
Caída de presión mezcla de reacción (bar)	0.22
Disposición tubos	Pitch triangular
Separación entre tubos (m)	0.11
Diámetro haz de tubos (m)	1.95
Número de tubos ecuador carcasa	18
Claridad (m)	0.1
Diámetro carcasa interna	2.15
Flujo fluido calefactor (kg/h)	15 000
Calor específico medio aceite térmico (kJ/kg K)	2.27
Densidad media aceite térmico (kg/m ³)	815
Caída presión lado de carcasa (bar)	Despreciable
Temperatura entrada aceite térmico (K)	560.15
Temperatura salida aceite térmico (K)	493.95
Calor intercambiado (kW)	630

Tabla 7: Especificaciones de diseño mecánico riguroso para reactor catalítico R-201

Parámetro	Valor
Espesor tubos (mm) según código diseño	2.80
Cédula tubos (mm)	5.50
Espesor carcasa (in)	0.5
Tipo cierre intercambiador de calor	Plano
Tipo cabezales reactor catalítico	Elipsoidal
Espesor cabezal plano (in)	13/2
Espesor cabezales abombados (mm)	12/13
Caudal de alivio (kg/h)	1298
Dimensionamiento válvula (mm ²)	342
Tipo de orificio según API 526	Tipo G

Tabla 8: Especificaciones de diseño mecánico del soporte del reactor catalítico heterogéneo R-201

Parámetro	Valor
Disposición recipiente	Vertical
Tipo de soporte	Falda
Peso muerto tubos (kN)	315.94
Peso muerto recipiente (kN)	73.84
Peso catalizador (kN)	127.53
Peso aceite térmico (kN)	315.61
Peso aislante (kN)	0.45
Cargas por viento (Pa)	1280
Espesor soporte falda con corrosión (mm)	8
Criterio tracción	$9.41 \leq 102.32$
Criterio compresión	$34.67 \leq 63.70$

Tabla 9: Especificaciones de aislante para la operación del reactor R-201

Parámetro	Valor
Material	Fibra mineral (lana de roca)
Casa comercial	ROCKWOOL
Nombre del producto adquirido	ProRox MA 960 ^{NA}
Coeficiente convección forzada aire exterior (W/m ² K)	9.53
Temperatura máxima aceite térmico (K)	560.15
Temperatura ambiente (K)	293.15
Conductividad térmica acero carcasa (W/m K)	52
Transferencia de calor crítica (kW)	207.84
Temperatura exterior carcasa (K)	559.56
Conductividad térmica material aislante (W/m K)	0.058
Densidad aislante (kg/m ³)	91
Espesor aislante (mm)	6.10

Tabla 10: Especificaciones de diseño básico para el intercambiador de calor E-201

Parámetro	Valor
Caudal de fluido de operación (kg/h)	4.17
Temperatura de entrada fluido (K)	493.95
Temperatura de salida fluido (K)	560.15
Calor específico medio fluido operación (kJ/kg°C)	2.37
Utilidad	Dowtherm Q
Temperatura de entrada de la utilidad (°C)	603.15
Temperatura de salida de la utilidad (°C)	573.15
Calor intercambiado (kW)	661.76
Caudal de aceite de servicio necesario (kg/s)	9.31
Coeficiente integral de transmisión de calor (kW/m ² K)	0.2
Diferencia de temperaturas media logarítmica (K)	59.60
Área de intercambio de calor (m ²)	55.6

Tabla 11: Especificación de diseño básico para el compresor reciprocante K-301

Parámetro	Valor
Y (suposición de gas ideal)	1.4
Presión de entrada (bar)	19.8
Presión de salida (bar)	25
Temperatura de entrada (°C)	493.15
Temperatura de salida (°C)	508.32
Constante de los gases (kJ/kmol K)	8.314
Peso molecular (kg/kmol)	34.80
Trabajo teórico de compresión (kJ/kg)	28.43
Caudal a comprimir (kg/s)	2.92
Trabajo teórico (kW)	83.13
Eficiencia de compresión adiabática (%)	75
Potencia de compresión (kW)	110.84

Tabla 12: Especificación básica de diseño para condensador parcial E-301

Parámetro	Valor
Caudal de fluido de operación (kg/h)	2.92
Temperatura de entrada fluido (K)	508.32
Temperatura de salida fluido (K)	308.15
Utilidad	Agua de enfriamiento, cw
Temperatura de entrada de la utilidad (K)	298.15
Temperatura de salida de la utilidad (K)	318.15
Calor intercambiado (kW)	3218.55
Calor específico <i>cooling water</i> (kJ/kg K)	4.18
Caudal de agua necesario (kg/s)	38.5
Coeficiente integral de transmisión de calor (kW/m ² K)	0.6
Diferencia de temperaturas media logarítmica	61.17
Área de intercambio de calor (m ²)	87.7

Tabla 13: Especificación básica de diseño tanque flash V-301

Parámetro	Valor
Tiempo de residencia (s)	15
Caudal volumétrico en condiciones operación (m ³ /s)	0.137
Volumen interno tambor flash (m ³)	2.06
Relación longitud/diámetro	1
Diámetro recipiente (m)	1.38
Espesor carcasa (mm)	19

Tabla 14: Especificación básica de diseño tanque flash V-401

Parámetro	Valor
Tiempo de residencia (s)	15
Caudal volumétrico en condiciones operación (m ³ /s)	1.296
Volumen interno tambor flash (m ³)	19.44
Relación longitud/diámetro	3
Diámetro recipiente (m)	2.02
Espesor carcasa (mm)	9

Tabla 15: Especificaciones básicas de diseño para condensador total E-301

Parámetro	Valor
Caudal de fluido de operación (kg/h)	1.03
Temperatura de entrada fluido (K)	351.18
Temperatura de salida fluido (K)	334.65
Utilidad	Agua de enfriamiento, cw
Temperatura de entrada/de salida de la utilidad (K)	298.15/318.15
Calor intercambiado (kW)	915.2
Calor específico <i>cooling water</i> (kJ/kg K)	4.18
Caudal de agua necesario (kg/s)	10.95
Coeficiente integral de transmisión de calor (kW/m ² K)	0.85
Diferencia de temperaturas media logarítmica	42.24
Área de intercambio de calor (m ²)	25.5

Tabla 16: Especificación básica de diseño para bombas centrífugas P-401 A/B

Parámetro	Valor
Presión de entrada (Pa)	50 000
Presión de salida (Pa)	100 000
ρ (kg/m ³)	754.7
W (J/kg)	66.3
Caudal de operación (kg/s)	1.03
N _{útil} (W)	68.2
Eficiencia de impulsión (%)	70
N _{freno} (kW)	0.1

Tabla 17: Especificación básica de diseño para la torre de purificación de reciclo T-402

Parámetro	Valor
Diámetro columna (m)	0.75
Altura columna (m)	14
Espesor carcasa (mm)	5
Razón de reflujo	0.02
Número de platos	20
Duty condensador (kW)	-865.19
Utilidad condenser	Agua de enfriamiento, cw
Temperatura entrada/Temperatura salida (°C)	25/45
Caudal utilidad condensador (kg/s)	10.35
Duty calderín de fondos (kW)	928.39
Utilidad <i>reboiler</i>	mps
Caudal utilidad calderín (kg/s)	0.48

Tabla 18: Especificaciones básicas de diseño para torre de purificación de producto T-403

Parámetro	Valor
Diámetro columna (m)	0.5
Altura columna (m)	8
Espesor carcasa (mm)	5
Razón de reflujo	4.87
Número de platos	10
Duty condensador (kW)	-193.83
Utilidad condenser	Agua de refrigeración, rw
Temperatura entrada/Temperatura salida (°C)	10/15
Caudal utilidad condensador (kg/s)	9.27
Duty calderín de fondos (kW)	219.46
Utilidad reboiler	lps
Caudal utilidad calderín (kg/s)	0.10

Teniendo en cuenta que el material de construcción del reactor catalítico heterogéneo, cuya decisión ha sido realizada de manera justificada, se aporta en el Anexo II. Cálculos Justificativos.

Tabla 19: Especificaciones básicas de diseño bombas centrífugas P-402 A/B

Parámetro	Valor
Número de Reynolds del fluido	103.9
α	0.5 (régimen laminar)
z_1 (m)	0.5
z_2 (m)	18
P_1 (Pa)	50000
P_2 (Pa)	100000
Rugosidad de la conducción (m)	0.00046
Factor de fricción de Darcy, f	0.62
Longitud conducciones (m)	41.15
Longitud equivalente accesorios (m)	8.23
Longitud total (m)	49.38
ΣF_{roz} (J/kg)	210.6
W (J/kg)	422.6
Caudal másico fluido (kg/s)	0.23
Potencia útil (W)	97.07
Eficiencia impulsión (%)	75
Potencia al freno (kW)	0.13

Tabla 20: Especificaciones básicas de diseño bombas centrífugas P-403 A/B

Parámetro	Valor
Número de Reynolds del fluido	60636.1
α	1 (régimen turbulento)
z_1 (m)	0.5
z_2 (m)	2.5
P_1 (Pa)	100000
P_2 (Pa)	100000
Rugosidad de la conducción (m)	0.000046
Factor de fricción de Darcy, f	0.023
Longitud conducciones (m)	31.04
Longitud equivalente accesorios (m)	6.21
Longitud total (m)	37.25
ΣF_{roz} (J/kg)	4.60
W (J/kg)	24.22
Caudal másico fluido (kg/s)	1.01
Potencia útil (W)	24.57
Eficiencia impulsión (%)	0.75
Potencia al freno (kW)	0.04

Tabla 21: Especificaciones básicas de diseño bombas centrífugas P-404 A/B

Parámetro	Valor
Número de Reynolds del fluido	145409.9
α	1 (régimen turbulento)
z_1 (m)	0.5
z_2 (m)	6
P_1 (Pa)	90000
P_2 (Pa)	100000
Rugosidad de la conducción (m)	0.000046
Factor de fricción de Darcy, f	0.019
Longitud conducciones (m)	12.19
Longitud equivalente accesorios (m)	2.44
Longitud total (m)	14.63
ΣF_{roz} (J/kg)	1.51
W (J/kg)	67.45
Caudal másico fluido (kg/s)	1.81
Potencia útil (W)	122.31
Eficiencia impulsión (%)	75
Potencia al freno (kW)	0.17

DOCUMENTO IV: ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

Contenido

1.	Estudio de impacto ambiental.....	3
1.1	Objeto y resumen	3
1.2	Descripción del proceso.....	4
1.3	Examen de alternativas viables	6
1.3.1	Justificación de la ubicación de la planta	6
1.3.2	Justificación de la tecnología implementada	7
1.4	Inventario ambiental e identificación de impactos	10
1.4.1	Aspectos físicos y biológicos.....	10
1.4.2	Molestias inducidas: ruido	15
1.4.3	Aspectos estético-culturales	16
1.4.4	Aspectos socioeconómicos.....	16
1.5	Identificación de los impactos ambientales	17
1.6	Medidas para la mitigación de impactos.....	20
1.6.1	Medidas preventivas de carácter general	20
1.6.2	Medidas para la minimización del impacto atmosférico	20
1.6.3	Medidas para minimizar el impacto en el suelo y en el agua	21
1.6.4	Sustancias peligrosas	21
1.6.5	Medidas para mitigación de los efectos del ruido	22
1.6.6	Medidas para evitar accidentes laborales.....	22
1.6.7	Medidas para evitar explosiones e incendios	23
1.6.8	Medidas para la mitigación del impacto visual	24
1.6.9	Medidas para reducir el impacto socioeconómico	24
1.6.10	Desmantelamiento de la instalación	25
1.6.11	Matriz ambiental	25
1.7	Programa de vigilancia ambiental	26
1.7.1	Ejecución y operación.....	26
1.7.2	Actividades de seguimiento	28
1.8	Conclusiones.....	29
2.	Estudio básico de seguridad y salud.....	30
2.1	Introducción y antecedentes	30
2.2	Objeto	31
2.3	Características de la obra.....	31

2.3.1	Puesta en marcha, documentación y trámites previos.....	32
2.3.2	Reconocimiento de la zona por el Adjudicatario	32
2.3.3	Organización previa de los trabajos	33
2.3.4	Organización de la zona de obra y desarrollo de trabajos	33
2.3.5	Tráfico rodado	33
2.3.6	Oficios, medios auxiliares y maquinaria para la realización de la obra ...	34
2.3.7	Superficie destinada a acopios y talleres	34
2.3.8	Métodos de recogida de escombros durante realización de la obra.....	34
2.3.9	Aparcamiento, reparación y mantenimiento de maquinarias y equipos móviles	35
2.3.10	Almacenamiento y depósito de materiales y elementos de obra	35
2.3.11	Mantenimiento y limpieza de los servicios durante la obra	36
2.4	Identificación y análisis de riesgos en la obra.....	36
2.4.1	Riesgos detectables más comunes	37
2.5	Medidas de prevención	38
2.5.1	Equipos de protección individual (EPIs)	39
2.5.2	Medidas de protección colectivas	44
2.5.3	Medidas preventivas de la maquinaria de obra.....	53
2.6	Normas de actuación preventiva.....	56
2.6.1	Seguridad durante la construcción.....	56
2.6.2	Medicina preventiva y primeros auxilios	60
2.6.3	Mantenimiento preventivo	62
2.6.4	Plan de emergencia	62
2.6.5	Plan de Seguridad y Salud	62
2.6.6	Libro de incidencias	63
2.6.7	Conclusiones.....	63
3.	Bibliografía.....	64

1. Estudio de impacto ambiental

1.1 Objeto y resumen

Este Estudio de Impacto ambiental perteneciente al proyecto de la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol tiene como propósito recoger y transmitir la información técnica al órgano ambiental que corresponda sobre los impactos que suponen tanto la construcción como la operación de la planta.

La inclusión del Estudio de Impacto Ambiental en el presente proyecto se justifica en base a la Ley 21/2013 de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, que define este estudio en el Artículo 5 como un “documento elaborado por el promotor que contiene la información necesaria para evaluar los posibles efectos significativos del proyecto sobre el medio ambiente y permite adoptar las decisiones adecuadas para prevenir y minimizar dichos efectos”.

En el Artículo 7 se introduce el ámbito de aplicación de la evaluación ambiental ordinaria, indicando que serán objeto del Estudio de Impacto Ambiental los proyectos comprendidos en el Anexo I (Proyectos sometidos a la evaluación ambiental ordinaria regulada en el título II, capítulo II, sección 1ª), así como los proyectos que alcancen los umbrales del Anexo I mediante la acumulación de las magnitudes o dimensiones de cada uno de los proyectos considerados.

La planta de producción de acetato de etilo se encuadra en el Grupo 5 (Industria química, petroquímica, textil y papelera) en instalaciones para la producción a escala industrial de sustancias mediante transformación química o biológica de hidrocarburos oxigenados.

El contenido del Estudio de Impacto Ambiental al que se refiere el Artículo 35 de la Ley 21/2013 se recoge en el Anexo VI: primeramente, se realizará una contextualización del impacto ambiental en el sector analizado (LVOC: *Large Volume Organic Chemicals*) realizando de manera breve una descripción del proceso y de la instalación que permite acometer la operación, indicando el consumo de agua, fuentes de energía y recursos no renovables así como los principales efectos ambientales. En este contexto se justifica tanto la selección de la ubicación de la planta -en términos económicos y logísticos- como de la tecnología dispuesta para transformar el bioetanol en acetato de etilo -a partir de las Mejores Técnicas Disponibles que permiten cumplir con los requerimientos medioambientales de VLE (valores límites de emisión)-.

El siguiente paso consistirá en el desarrollo de un inventario ambiental donde se reflejan las principales emisiones del proceso y sus impactos más destacables en términos de contaminación atmosférica, ruidos y generación de aguas residuales y residuos, entre otros puntos a valorar. Lógicamente este apartado será acompañado por las medidas a adoptar para mitigar los potenciales daños causados y depurar las corrientes

contaminadas en el contexto de la construcción de la planta y de la explotación del proceso. Finalmente se incluirá un Programa de Vigilancia Ambiental en el que se resumen los sistemas de control empleados para analizar cada uno de los impactos generados y un breve documento de síntesis.

1.2 Descripción del proceso

Las directrices a seguir para la construcción segura de la planta de producción de acetato de etilo han sido introducidas en el pliego de condiciones generales, pliego de condiciones particulares y estudio básico de seguridad y salud. La planta tendrá una capacidad de producción de 50 000 t/año para una operación en régimen continuo (24 horas al día) durante 330 días al año, destinando el mes de parada a operaciones de mantenimiento y regeneración del catalizador, líquido iónico y aceite térmico.

Tal y como se ha introducido en la Memoria, el proceso productivo se puede dividir en las siguientes secciones:

- Acondicionamiento de la alimentación (sección 100): la corriente de reactivos procedentes de Bioetanol Galicia, rica en bioetanol y con impurezas de acetaldehído, se mezcla con la materia prima (bioetanol puro) no reaccionante procedente de la sección 400. Esta corriente de alimentación al reactor se acondiciona hasta alcanzar las condiciones óptimas de operación, deducidas en base al estudio termodinámico presentado: mediante el uso de una bomba centrífuga se aumenta su presión hasta 20 bar y con la ayuda de tres intercambiadores de calor se transmite el calor sensible y el calor latente necesario para aumentar la temperatura de la corriente hasta 220°C.
- Etapa de reacción (sección 200): tiene lugar el sistema reactivo que deriva en la deshidrogenación del bioetanol a acetaldehído y la reacción de estos dos compuestos para dar acetato de etilo como producto principal e hidrógeno como subproducto; asimismo, se produce acetaldol en la autocondensación aldólica no deseada del acetaldehído. Esta reacción tiene lugar en un reactor multitubular dispuesto verticalmente rodeado por una carcasa donde fluye aceite térmico: los tubos están llenos de gránulos de catalizador y para compensar los efectos endotérmicos que disminuyen la actividad y selectividad del entramado catalítico se hace pasar un fluido calefactor en configuración de circuito cerrado.
- Acondicionamiento de los productos (sección 300): en esta etapa se aíslan los compuestos no condensables (hidrógeno gas libre de CO_x). Para conseguir separar el hidrógeno es necesario comprimir la corriente de salida del reactor (para compensar la caída de presión que ha experimentado la mezcla reaccionante a través de su paso por el lecho catalítico) y posteriormente enfriarla hasta temperatura ambiente para que condensen los compuestos orgánicos que saldrán por colas del tambor flash, mientras que el hidrógeno en fase gas sale por cabezas. El último paso de acondicionamiento de los productos

es su disminución de presión hasta condiciones atmosféricas empleando una válvula de estrangulamiento.

- Etapa de separación (sección 400): se operará a presión atmosférica para disminuir los costes asociados. En una primera columna de destilación extractiva se rompe el azeótropo etanol-acetato de etilo empleando un líquido iónico, [emim][MeSO₃] como *entrainer*. La corriente de colas será la línea de reciclo, donde en un tanque flash se recupera el líquido iónico, que fluye en configuración de circuito cerrado, para posteriormente separar el bioetanol -a recircular a la sección 100- del acetaldol, que es uno de los efluentes del proceso; la corriente de cabezas será la línea de purificación de producto, que se separa del acetaldehído en una pequeña torre hasta conseguir las especificaciones que demande el mercado.

En lo tocante a los recursos consumidos por la planta de producción, se encuentra la corriente rica en bioetanol como materia prima, agua de enfriamiento y agua de refrigeración para la operación de los intercambiadores de calor de carcasa y tubos destinados a enfriar corrientes de proceso y de los condensadores de las columnas de destilación y vapor de agua para el calentamiento de corrientes de proceso y como utilidad en los calderines de las torres de destilación (parcialmente generado por la combustión del H₂ obtenido como subproducto lo cual ayuda a minimizar costes). También se consume electricidad para el funcionamiento del motor que impulsa las bombas centrífugas, el movimiento del pistón en el compresor recíprocante y para la obtención de aire comprimido para instrumentación.

El metanosulfonato de 1-etil-3-metilimidazolio utilizado como *entrainer* en la destilación azeotrópica y el aceite térmico Dowtherm Q empleado en el contexto de la operación del reactor catalítico heterogéneo fluyen en circuito cerrado con el fin de conseguir que el proceso productivo sea viable desde un punto de vista económico. El catalizador empleado también se regenera tras los 11 meses de operación continua, en el momento en que empieza a presentar síntomas de desactivación.

Los efectos ambientales de la planta de acetato de etilo más destacados son:

- Emisión de gases: suponiendo un aislamiento ideal del H₂ en el tambor flash previo a la sección de separación, las emisiones de gases serían las procedentes de la combustión de gas natural en las calderas de generación de vapor de baja, media y alta presión que actúan como utilidades en la planta. Este combustible también se utiliza en el E-201 que calienta el aceite térmico con anterioridad a su entrada al reactor. También hay que tener en cuenta que el acetaldehído, el acetato de etilo y el bioetanol son compuestos volátiles (punto de ebullición inferior a 80°C) y se pueden producir emisiones contingenciales en fugas.
- Aguas residuales: como tal, el proceso no genera corrientes de agua contaminada; no obstante, sí se producen corrientes de agua residual en los

equipos de uso general en planta, en las operaciones de limpieza y mantenimiento y aguas pluviales. Ahora bien, las salidas de las torres de purificación que no sean el producto y el reactivo que no ha reaccionado consisten en efluentes líquidos que serán gestionados por una empresa especializada en el tratamiento de residuos.

- Residuos: se clasifican en peligrosos o inertes, siendo los primeros aquellos derivados del proceso productivo (gránulos de catalizador, aceite térmico usado y *entrainer*) y los segundos aquellos que se generan como resultado de procesos constructivos que impliquen obras y de operaciones de limpieza y mantenimiento en la batería del proceso o en las instalaciones situadas en los alrededores.
- Ruidos: los equipos mecánicos que producen mayor contaminación acústica son aquellos que contienen elementos móviles que giran a gran velocidad (impulsores de fluidos para proceso y generación de aire de instrumentación).

1.3 Examen de alternativas viables

En el seno del análisis de alternativas se realizará una justificación coherente tanto de la ubicación seleccionada para la instalación de la planta como de la tecnología implementada para operativizar el proceso.

1.3.1 Justificación de la ubicación de la planta

La ubicación seleccionada para la planta de producción de acetato de etilo se justifica principalmente en base a la cercanía de la planta de Bioetanol Galicia, encargada de suministrar la única materia prima del proceso productivo. En la deducción de los costes de explotación (ver Anexo IV. Análisis de viabilidad económica) se ha comprobado que la adquisición del bioetanol es la partida que supone un porcentaje mayor, por lo que reducir costes logísticos de transporte es crítico para conseguir que la operación sea viable desde un enfoque económico.

La selección realizada también se basa en la excelente comunicación del Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro con el enclave marítimo constituido por el Puerto Exterior de A Coruña (la autovía A6 A Coruña-Madrid se encuentra a 5 km) que permite una rápida y sencilla exportación del acetato de etilo producido. Las conexiones de ferrocarril también son altamente eficientes, tanto con el centro de la Península Ibérica como con la zona transcantábrica con enlaces diarios a Irún.

Otro motivo a tener en cuenta es la cercanía a zonas altamente industrializadas (menos de 50 km con el Polígono de A Grela-Bens en A Coruña y el Polígono de Sabón en Arteixo) que requieran de hidrógeno como reactivo en cualquiera de sus procesos productivos; por poner un ejemplo en una refinería, en las operaciones de hidrocrackeo o HDS. La producción de H₂ puro y su posterior venta dota de un colchón a la planta que permite un mejor aprovechamiento de los recursos de los que dispone.

1.3.2 Justificación de la tecnología implementada

Para el análisis de los aspectos tecnológicos adoptados en la planta con el propósito de transformar el bioetanol en acetato de etilo se recurre a las Mejores Técnicas Disponibles (BAT en inglés, *Best Available Techniques*) recogidas en los documentos de referencia denominados como BREF enmarcados en el seno de la Directiva de Emisiones Industriales (2010/75/EU) y la Directiva IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*), que hace referencia a la Ley 16/2002 (de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. Define la autorización ambiental integrada como la resolución del órgano competente de la comunidad autónoma por la que se permite, para efectos de protección del medio ambiente y de la salud de las personas, explotar la totalidad o parte de una instalación bajo determinadas condiciones destinadas a garantizar que esta cumple las disposiciones de la Ley).

Los documentos BREF son elaborados en un ámbito de intercambio de información auspiciado por la IED (*Industrial Emissions Directive*) en su artículo 13. Éstos no son documentos legales, que se publican en forma de decisiones en el DOUE (documentos legales europeos). En ellos se recogen las MTD, que se definen como las soluciones tecnológicas que se deben implementar en una planta para cumplir los requerimientos de valores límites de emisión, reduciendo el impacto medioambiental, las emisiones y la salud de las personas en condiciones viables tanto técnica como económicamente.

No existe un documento BREF específico para plantas de producción de acetato de etilo, por lo que hay que recurrir a un archivo transversal que englobe las Mejores Técnicas Disponibles para el caso de industria química orgánica de gran volumen de producción (*Large Volume Organic Chemicals*), publicado en diciembre de 2017. En este BREF se recogen el acetato de etilo como uno de los productos a los cuales aplica (en el punto 2.1.2.4.3, en la subcategoría de ésteres) y la operación unitaria de deshidrogenación (en el punto 2.2.7) como proceso habitual en la obtención de compuestos orgánicos a gran escala; los aspectos genéricos de este esquema reactivo relacionados con la obtención de acetato de etilo en lo vinculante a efectos medioambientales se recogen en la tabla 1.

Tabla 1: Impactos medioambientales genéricos del proceso de deshidrogenación a acetato de etilo (BREF)

Aire	Obtención de grandes volúmenes de H ₂ con compuestos orgánicos volátiles susceptibles de ser venteados
Líquidos	Los residuos líquidos pueden ser quemados en vistas a una posible valorización energética
Residuos	Catalizador desactivado, aceite usado y agentes extractivos (en este caso, el <i>entrainer</i>) que no pueden ser reciclados.

El documento BREF, a pesar de aglutinar los procesos de obtención de compuestos orgánicos a gran escala, trata una serie de procesos ilustrativos a modo de ejemplo, profundizando en las técnicas a adoptar para implementar un proceso que cumpla las directrices medioambientales que respeten la legislación vigente; estos procesos son

destinados a la obtención de olefinas inferiores, compuestos aromáticos, etilbenceno y estireno, formaldehído, óxido de etileno y etilenglicoles, fenol, etanolaminas, diisocianato de tolueno y diisocianato de difenilmetano, dicloruro de etileno y cloruro de vinilo monómero y peróxido de hidrógeno, explicitadas en las secciones 3-12 respectivamente.

Por este motivo, las Mejores Técnicas Disponibles introducidas para justificar la selección de la tecnología implementada se corresponderá con las presentadas en la sección 13, dedicada a las conclusiones generales extraídas para la producción a gran escala de compuestos orgánicos entre los cuales se encuentra el acetato de etilo dada su condición de hidrocarburo oxigenado.

En lo relativo a las emisiones atmosféricas se implanta la Mejor Técnica Disponible número 8, para reducir la carga de contaminantes que se envía a la fase de tratamiento final de los gases residuales y aumentar la eficiencia en el uso de los recursos; consiste en aplicar a los flujos de gases de proceso una combinación adecuada de las siguientes técnicas:

- Recuperación y utilización del hidrógeno generado como consecuencia de reacciones químicas (en este caso la deshidrogenación de bioetanol para dar acetaldehído y la reacción del bioetanol en exceso con este acetaldehído). Se pueden emplear técnicas de recuperación como la adsorción por cambios de presión (PSA: *Pressure Swing Adsorption*) o la utilización de membranas para aumentar el contenido en H₂. La aplicabilidad de esta técnica puede verse limitada si la demanda de energía para la recuperación es excesiva debido al bajo contenido de hidrógeno (lo cual no ocurre en este caso) o cuando no hay demanda (sí que la hay, en base a lo introducido en la justificación de la ubicación escogida).
- Recuperación y utilización de disolventes orgánicos y materias primas orgánicas sin reaccionar mediante compresión, condensación, destilación extractiva y destilación tradicional. El algoritmo de técnicas utilizada puede depender de consideraciones de seguridad, como la presencia de sustancias contaminantes. La aplicabilidad de esta técnica puede verse limitada si la demanda de energía para la recuperación es excesiva debido al bajo contenido orgánico a recuperar; en este caso, al tener el bioetanol una conversión del 65% por paso es prácticamente obligatorio introducir un lazo de recirculación para que el proceso sea viable desde un enfoque económico.

Del mismo modo, para reducir la carga de contaminantes que se destina a la fase de tratamiento final de los gases residuales y aumentar la eficiencia energética se introduce la Mejor Técnica Disponible número 9, que consiste en enviar a una unidad de combustión los flujos de gases de proceso con un poder calorífico suficiente. Se debe dar prioridad a los puntos de la MTD número 8 (recuperación del H₂ y recirculación de

las materias primas no reaccionantes) antes que al envío de flujos de gases de proceso a una unidad de combustión. En el caso de la planta actual, se puede destinar parte del H_2 obtenido como combustible en una caldera para obtener utilidades y así aumentar la viabilidad de la planta; con esto se conseguiría además un proceso virtualmente libre de emisiones de gases de efecto invernadero del tipo CO_x (sin huella de carbono).

El siguiente ítem tratado en el BREF es relativo a emisiones de agua, no aplicable a la presente planta dado que las aguas residuales obtenidas en planta no son consecuencia de la explotación del proceso, por lo que se trata la eficiencia en el uso de los recursos a través de la Mejor Técnica Disponible 15; para aumentar la eficiencia en el uso de los recursos cuando se utilizan catalizadores hay que buscar una combinación de:

- Seleccionar un entramado catalítico con el que se consiga el equilibrio óptimo entre los factores siguientes: actividad, selectividad, estabilidad y libre de metales tóxicos.
- Protección del catalizador, introduciendo técnicas en pasos anteriores para proteger al catalizador de venenos (no es necesario en este caso un pretratamiento de las materias primas dado que ninguna actúa como agente desactivador).
- Optimización del proceso: control de las condiciones de operación del reactor (temperatura y presión) para conseguir el equilibrio óptimo entre la eficiencia dada por la conversión y la vida útil del catalizador.
- Monitorización de la eficiencia de conversión para detectar el inicio de la descomposición del catalizador utilizando parámetros adecuados.

Como ya se ha introducido en la Memoria y en el Anexo II. Cálculos Justificativos, todos estos puntos se cumplen. De hecho, la ruta de reacción que posibilita el diseño novedoso de esta planta se basa en las privilegiadas propiedades que presenta el catalizador empleado.

También con el propósito de mejorar la eficiencia en el uso de los recursos se introduce la Mejor Técnica Disponible número 16, que consiste en recuperar y reutilizar los disolventes orgánicos utilizados en procesos (aceite térmico en la reacción química) u operaciones (líquido iónico en la destilación azeotrópica) mediante técnicas adecuadas, reintroduciéndolos en el proceso u operación. La cantidad recuperada y reutilizada depende de cada proceso.

A continuación, el BREF recoge la Mejor Técnica Disponible número 17 relativa a reducir la cantidad de residuos que se someten a eliminación. En el caso de la planta actual se aplican las siguientes técnicas para recuperar materias para su reciclado:

- Recuperación de materiales (materias primas, productos y subproductos) mediante aislamiento bien en tambores flash o en columnas de destilación. Es

una técnica aplicable únicamente si hay demanda de esos materiales recuperados.

- Regeneración de catalizadores por tratamiento químico; en este caso, mediante la adición de una corriente de H₂ que, como se ha indicado en la Memoria, activa el entramado catalítico aumentando la eficiencia del proceso.

Por último, se recoge la Mejor Técnica Disponible número 19 para prevenir o reducir las emisiones al aire y el agua generadas en condiciones distintas de las nominales, consistente en aplicar medidas en proporción con la pertinencia de las liberaciones potenciales de contaminantes durante las operaciones de arranque y parada además de en otras circunstancias, como pueden ser trabajos de mantenimiento u operaciones de limpieza.

1.4 Inventario ambiental e identificación de impactos

En este apartado del Estudio de Impacto Ambiental se hace un breve estudio acerca de los impactos que la construcción y explotación de la planta de producción de acetato de etilo puede causar en el enclave geográfico en la cual se instala. Con este propósito, se describe la situación previa al comienzo de las obras y se analiza qué aspectos pueden variar una vez esté funcionando la planta; la comparación del contexto inicial y final permite estipular la importancia del impacto producido.

Para llevar a cabo este pequeño análisis se tienen en cuenta múltiples factores, entre los que destacan los biológicos y físicos, molestias y riesgos inducidos y elementos estético-culturales y socioeconómicos.

1.4.1 Aspectos físicos y biológicos

En este primer subapartado se tratará el impacto sobre el régimen climático de la zona y el efecto de las emisiones atmosféricas sobre la calidad del aire. Asimismo, se tendrán en cuenta los términos relativos a factores biológicos, como el hábitat conjugado por flora, fauna y medios hidrológicos de la zona.

1.4.1.1 *Clima*

El análisis de los factores climáticos facilita la comprensión de los demás factores físicos y biológicos del medio dado que determina las características del suelo. En función del tipo de suelo en tanto a sus características nutricionales y granulométricas puede crecer uno u otro tipo de vegetación, que a su vez sirve de base en la cadena trófica para la fauna del ecosistema.

En este caso, la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de bioetanol se encuentra emplazada en el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro, situado en Teixeira (A Coruña). En esta zona predomina un clima temperado del tipo CSB según la clasificación de Köppen y Geiger, con veranos secos, inviernos templados y precipitaciones concentradas en el solsticio de invierno. La tabla 2 recopila valores promedio de diferentes parámetros agrupados por meses.

Tabla 2: Tabla climática en el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro (climate-data)

Mes	T media (°C)	T mínima (°C)	T máxima (°C)	Precipitaciones(mm)
Enero	7.5	3.9	11.1	138
Febrero	8.3	4.6	12	126
Marzo	9.9	6.1	13.7	126
Abril	10.4	6.4	14.4	97
Mayo	13.1	9	17.2	86
Junio	15.7	11.4	20.0	59
Julio	17.7	13.4	22.1	37
Agosto	18.7	14.1	23.3	45
Septiembre	16.6	12.3	20.9	76
Octubre	13.3	9.5	17.2	120
Noviembre	9.4	5.8	13.1	152
Diciembre	7.9	4.3	11.5	168
ANUAL	12.4	8.4	14.6	90.2

La información presentada en la tabla anterior se puede sintetizar de manera gráfica en la figura 1.

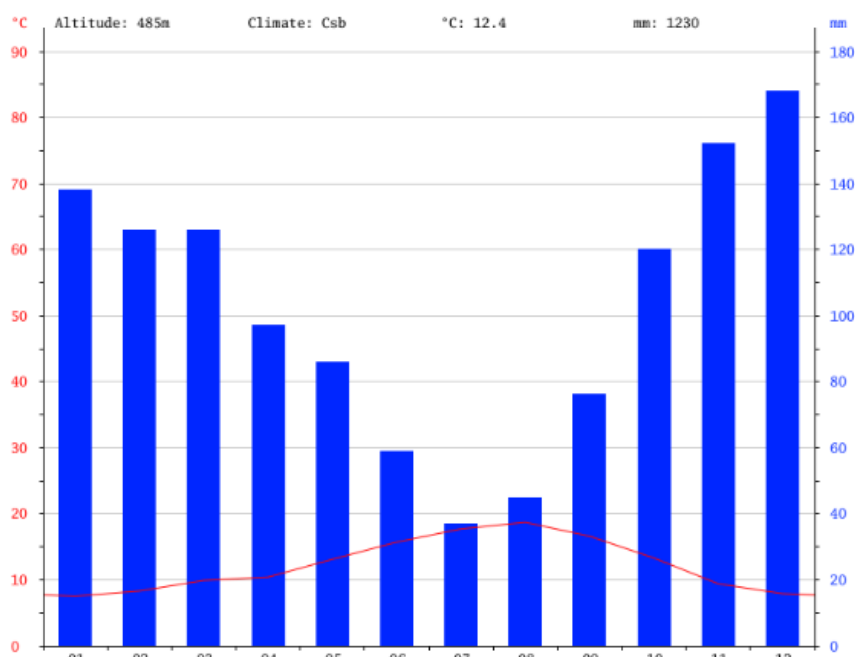


Figura 1: Climograma del Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro (climate-data)

En el atlas eólico desarrollado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital se puede estudiar información acerca del viento de la zona, siendo las más interesantes la frecuencia anual, que informa acerca del porcentaje de horas que el viento sopla en una dirección, y la velocidad media, calculada como una fracción de la velocidad media en todas las direcciones.

Con la información presentada en el apartado de frecuencia anual se podría construir la rosa de los vientos de la zona; en este caso, se opta por presentar la información en la tabla 3 con la dirección del viento presentada con los puntos cardinales siguiendo el sentido de las agujas del reloj.

Tabla 3: Distribución del viento por direcciones y velocidades a 80 m de altura en Teixeira (IDAE)

Dirección del viento	Frecuencia anual (%)	Velocidad media (m/s)
Norte (N)	4.23	5.46
Nor-noreste (NNE)	3.51	5.45
Noreste (NE)	4.56	6.31
Este-noreste (ENE)	9.27	8.15
Este (E)	10.32	9.43
Este-sureste (ESE)	4.49	8.16
Sureste (SE)	2.36	7.00
Sur-sureste (SSE)	3.84	8.23
Sur (S)	5.62	9.14
Sur-suroeste (SSW)	9.99	9.72
Suroeste (SW)	12.26	8.76
Oeste-suroeste (WSW)	6.6	7.13
Oeste (W)	4.79	6.59
Oeste-noroeste (WNW)	4.79	6.07
Noroeste (NW)	7.41	5.36
Nor-noroeste (NNW)	5.98	5.24

Se puede comprobar que las dos direcciones preferenciales son la este (E) y la suroeste (SW); no obstante, los valores son muy homogéneos, por lo que la influencia del viento en la construcción e instalación de la planta no es capital.

De toda esta información se concluye que el impacto de la instalación de la planta de producción sobre la climatología de la zona, considerando que además se trata de un Polígono Industrial, es prácticamente despreciable dado que la fragilidad del clima en el estado preoperacional es baja.

1.4.1.2 Calidad del aire

Para realizar el análisis de la calidad de aire hay que hacer referencia al Real Decreto 102/2011 de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, que tiene como objetivos el propósito de evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias mencionadas sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza:

- Definir y establecer objetivos de calidad del aire, de acuerdo con el anexo III de la Ley 34/2007, con respecto a las concentraciones de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, material particulado de tamaño variable,

plomo, benceno, monóxido de carbono, ozono, arsénico, cadmio, níquel y benzo-a-pireno en el aire del ambiente.

- Regular la evaluación, el mantenimiento y la mejora de la calidad del aire en relación con las sustancias enumeradas en el apartado anterior y los hidrocarburos aromáticos policíclicos distintos al benzo-a-pireno.
- Establecer métodos y criterios comunes de evaluación de las concentraciones de las sustancias reguladas en el primer apartado, el mercurio y los HAP y de los depósitos de arsénico, cadmio, mercurio y níquel.
- Determinar la información a la población y a la Comisión Europea sobre las concentraciones y los depósitos de las sustancias mencionadas en los apartados anteriores, el cumplimiento de sus objetivos de calidad del aire, los planes de mejora y demás aspectos regulados en la presente norma.
- Establecer para el amoníaco, de acuerdo con el anexo III de la Ley 34/2007, métodos y criterios de evaluación y establecer la información a facilitar a la población y a intercambiar entre las administraciones.

El Real Decreto 102/2011 de 28 de enero se ve modificado por el Real Decreto 678/2014 de 1 de agosto (en tanto a las concentraciones límite de cloro molecular, cloruro de hidrógeno, compuestos de flúor, fluoruro de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y sulfuro de carbono) y el Real Decreto 39/2017 de 27 de enero.

En el Anexo I del RD 102/2011 se presentan los objetivos de calidad del aire para los distintos contaminantes en términos de valores límite para la protección de la salud, nivel crítico para la protección de la vegetación y umbral de alerta. En la tabla 4 se recoge el valor límite anual para un volumen de un metro cúbico medido a una temperatura de 293 K y una presión de 1 atmósfera (condiciones normales).

Tabla 4: Objetivos de calidad del aire para los distintos contaminantes (RD 102/2011 de 28 de enero)

Sustancia contaminante	Valor límite anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
SO ₂	125 (diario, no más de 3 días)
NO ₂	40
PM ₁₀	40
PM _{2.5}	20 (a partir de 1/1/2020)
Plomo	0.5
Benceno	5
CO	10000
Ozono troposférico	120
Arsénico	0.006
Cadmio	0.005
Níquel	0.02
Benzo-a-pireno	0.001

La planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol no emite a la atmósfera ninguno de los contaminantes contemplados en el Real Decreto pertinente. No obstante, sí que se llevan a cabo emisiones de gases de efecto invernadero (NO_2 , SO_2 y fundamentalmente CO y CO_2) a colación de la combustión de gas natural en las calderas para la generación de vapor de agua que será empleado como utilidad en la planta.

Estas emisiones están reguladas por el Real Decreto 101/2011 de 28 de enero, por el que se establecen las normas básicas que han de regir los sistemas de acreditación y verificación de las emisiones de gases de efecto invernadero y los datos toneladas-kilómetro de los operadores aéreos y de las solicitudes de asignación gratuita transitoria de instalaciones fijas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005 de 9 de marzo, por la que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.

En la zona del Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro, la calidad del aire es buena (un valor de 62/100 cuando el valor aceptable según el criterio escogido en la página *Breez-o-meter* es de 52/100 para España) siendo el ozono troposférico el principal contaminante en el aire (una concentración aproximada de 47.79 ppb, que se corresponde con 95.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aún lejos del valor límite presentado en la tabla 4). Dado que la explotación de la planta de producción no implica la emisión de ninguno de los contaminantes contemplados en el RD 102/2011, se considera que el impacto de la instalación sobre la calidad del aire va a ser mínimo.

1.4.1.3 Flora y fauna

El clima CSB (mediterráneo con influencia oceánico) es el predominante en la mayor parte de la superficie gallega, enclave donde se sitúa el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro, en el interior de la provincia de A Coruña cerca de la frontera geográfica con la zona lucense. La vegetación resultante de esta climatología es arbórea del tipo perennifolio (donde las hojas de los árboles y arbustos permanece en la planta todo el año, ahorrando así una excesiva producción de material vegetal) basada en árboles no muy altos y en estratos herbáceos y de matorrales, donde la formación vegetal más extensa está constituida por la landa atlántica donde destacan los *toxos* y las *xestas*.

No obstante, profundizando en el enclave gallego con una mayor influencia del Océano Atlántico, el bosque típico está formado por especies caducifolias como el roble (*carballo*) y el castaño (*castiñeiro*) cuyas formaciones se han visto muy reducidas en los últimos años por la acción humana. Por este motivo, el paisaje boscoso gallego está hoy inundado de grandes extensiones de pinos (*piñeiros*, introducidos hace poco más de un siglo) y desde hace unos años, por eucaliptos; esta filosofía ha sido criticada recientemente por las alteraciones ambientales que supone para las especies autóctonas, así como por la posible degradación de los suelos.

En lo tocante a la fauna, es altamente abundante y variada teniendo en cuenta el contraste de mar y montaña que se encuentra en la zona gallega. La fauna autóctona está constituida por animales tan diversos como el oso pardo, el lobo, el zorro, la garduña, el jabalí o el corzo. También gozan de buena salud especies insectívoras como el erizo, réptiles de gran valor morfológico y murciélagos. A esta fauna “terrestre” hay que sumar la excepcional variedad de peces, crustáceos y mariscos tan abundantes en las aguas de las largas y recortadas costas, así como la gran diversidad ornitológica tanto en el mar como en el interior.

Puesto que la planta de producción se va a emplazar en un Polígono Industrial, el impacto sobre la fauna y la flora locales va a ser mínimo más allá de la pérdida de los elementos discretos pertenecientes a las parcelas que se van a industrializar.

1.4.1.4 Hidrología

En el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro, la captación de agua se realiza directamente desde el río Mandeo hasta la actuación industrial a través de una concesión otorgada por la Dirección General de Obras Hidráulicas. Dentro de la Zona Verde central del Polígono se ubican dos depósitos reguladores: uno para regular el caudal de agua bruta y otro para agua tratada, además de una estación de tratamiento de agua potable.

El saneamiento de aguas pluviales y residuales es de tipo separativo, incluyendo el propio complejo industrial una EDAR. Una vez depuradas las aguas residuales y obtenidas las condiciones de calidad exigidas, serán vertidas al río Mandeo por medio de un emisario. La red de saneamiento de aguas pluviales vierte hacia el cauce del río en dos puntos diferentes.

1.4.2 Molestias inducidas: ruido

En este apartado del inventario ambiental se pretende analizar la influencia de la construcción y explotación de la planta sobre el estilo de la vida de la población situada en los alrededores del emplazamiento escogido, especialmente en términos de ruido. De primeras, cabe destacar que la planta se ha ubicado en un Polígono Industrial alejado de núcleos poblacionales, por lo que las molestias inducidas por ruido van a ser mínimas.

El pueblo más cercano a la parcela escogida es Teixeira, situado a una distancia de 2 kilómetros. Las principales fuentes de ruido en las instalaciones serán los equipos que incluyan elementos rotativos en su interior, como pueden ser las bombas centrífugas y los compresores recíprocos; no obstante y como ya se ha dicho, se encuentra en una zona industrializada en la que el uso del terreno disponible está optimizado para minimizar las molestias sobre la población.

Aun así, es necesario que en la planta se respete la legislación vigente en términos de contaminación acústica. A través del Real Decreto 1367/2007 de 19 de octubre se desarrolla la Ley 37/2003 de 17 de noviembre, del ruido en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas; esta Ley tiene por objetivo prevenir,

vigilar y reducir la contaminación acústica para evitar y reducir los daños que de ésta se pueden derivar para la salud humana, los bienes o el medio ambiente. Están sujetos a las prescripciones de esta Ley todos los emisores acústicos, ya sean de titularidad pública o privada, así como las edificaciones en su calidad de receptores acústicos. Asimismo, en el artículo 7 de esta Ley se clasifican las áreas acústicas en función del uso predominante del suelo; para la planta de producción se trazan las directrices para un sector del territorio con predominio de suelo de uso industrial.

El Real Decreto tiene como objetivo establecer las normas necesarias para el desarrollo y ejecución de la Ley 37/2003 del ruido de 17 de noviembre; en él se define valor límite como “un valor de un índice acústico que no debe ser sobrepasado y que de superarse, obliga a las autoridades competentes a prever o a aplicar medidas tendentes a evitar tal superación. Los valores límite pueden variar en función del emisor acústico (ruido del tráfico rodado, ferroviario o aéreo, ruido industrial, etc...), del entorno o de la distinta vulnerabilidad a la contaminación acústica de los grupos de población; pueden ser distintos de una situación existente a una nueva situación (cuando cambia el emisor acústico, o el uso dado al entorno)”.

En el Anexo I, de índices de ruido, se establecen los tres periodos de evaluación diarios: periodo de día al cual le corresponden 12 horas (7:00 AM-7:00 PM), periodo tarde al cual le corresponden 4 horas (7:00 PM-11:00 PM) y periodo noche constituido por 8 horas (11:00 PM-7:00 AM). La administración competente podrá modificar la hora de comienzo del periodo diario, que aplicará a todas las fuentes de ruido. En este Anexo I también se introduce la metodología de cálculo del índice de ruido, que en cualquier caso no podrá ser superior a los valores límite presentados en el Anexo II de objetivos de calidad acústica. Para el tipo de área acústica introducido por el artículo 7 del Real Decreto, los valores límites son de 75 dB para la actividad durante el día y la tarde y de 65 dB para la explotación nocturna.

1.4.3 Aspectos estético-culturales

En el contexto del proyecto desarrollado en este Trabajo Fin de Grado no se ve involucrado ningún elemento de interés cultural que se pueda ver afectado, dado que la planta se va a instalar en un emplazamiento destinado a su explotación industrial.

Por este motivo, el impacto visual de la planta es menor al encontrarse rodeado de explotaciones similares. Además, en la actualidad se han puesto en marcha otros proyectos similares en el propio Polígono Industrial tales como una planta de revalorización energética de biomasa y una planta de explotación láctea.

1.4.4 Aspectos socioeconómicos

La población de los núcleos poblacionales más cercanos es ligeramente superior a los 4500 habitantes con dos concentraciones importantes en Teixeira (parroquia de Santa Eulalia de Curtis), donde está la capitalidad municipal, y en Curtis (parroquia de Santa María de Lourdes). El resto de la población se distribuye por los 117 km² de su superficie,

con una baja densidad poblacional: poco más de 45 habitantes por kilómetro cuadrado. El desarrollo de la actividad económica en el municipio refleja un equilibrio en relación al número de habitantes, según lo indicado en la tabla 5.

Tabla 5: Entorno socioeconómico de la comarca de Curtis (Curtis Industrial)

Actividad	Curtis	Comarca
Industria	12.3%	100%
Comercio mayorista	6.4%	100%
Comercio minorista	16.8%	100%
Turístico	11%	100%
Actividad económica	12.3%	100%
Número de habitantes	4628	37811
% población	12.2%	100%

En el municipio, el sector comercial y de servicios destaca sobre el industrial (un 80% de las licencias aplican al sector terciario). Además, el sector primario tiene una gran importancia en el territorio empleando de forma directa a un elevado porcentaje de la población y generando numerosos empleos secundarios en temas relacionados con la transformación de productos lácteos y venta de productos relacionados con las explotaciones ganaderas. La agricultura y los tipos de cultivo están articulados entorno a la ganadería, con un 75% de la superficie agraria total cultivada dedicada a prados, pastizales y cultivos forrajeros.

En el Ayuntamiento de Curtis el comercio minorista tiene una gran relevancia, tanto por la cantidad de establecimientos como por el número de personas empleadas en los mismos. Este hecho revela una importante actividad comercial en el municipio en relación a dos ejes centrales: población y extensión, que presenta la peculiaridad de estar orientada de forma inversa al resto de los municipios de la comarca, dado que el número de establecimientos dedicados a actividades relacionadas con la alimentación es inferior a los de no alimentación. Un sector escasamente explotado es el turismo.

De todo este análisis se concluye que la construcción y explotación de la planta implica un impulso a la economía local mediante la generación de puestos de trabajo directos e indirectos a ser cubiertos en su totalidad por la población que vive en la zona. Si se requiriese de puestos técnicos, se apostaría por la formación mediante cursos impartidos por especialistas en la materia.

1.5 Identificación de los impactos ambientales

La valoración de los impactos descritos en el inventario ambiental se realiza atendiendo a una serie de parámetros cualitativos, que ayudan a realizar una descripción lo más científica posible de la trascendencia que un impacto determinada sobre la zona de instalación de la planta. Estos parámetros son:

- Extensión: mide la influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto (porcentaje del área respecto a la zona en la cual se manifiesta el efecto).
- Momento: considera el tiempo transcurrido entre la elaboración del proyecto (tiempo asumido como inicial) y la manifestación del efecto que es consecuencia de la instalación de la planta.
- Duración: permite diferenciar entre efectos según el periodo en el cual se manifiesten; tiene en cuenta el periodo temporal que abarca desde su aparición hasta que se vuelve a las condiciones previas iniciales por medios naturales o mediante la introducción de medidas correctoras. Siguiendo este criterio, los efectos pueden ser temporales (cuando cesa la actividad deja de existir el efecto), permanentes (el efecto se mantiene aunque cese la actividad) e intermitentes (vinculado a una actividad discontinua).
- Reversibilidad: hace referencia a la posibilidad de recuperar el factor perjudicado por el impacto. Así se distinguen efectos reversibles (cuando cesa la actividad se retorna a las condiciones preoperacionales), efectos irreversibles (las condiciones previas al comienzo del proyecto jamás se recuperan) y efectos recuperables (las condiciones previas se recuperan tras un cierto periodo de tiempo).
- Acumulación: informa sobre el incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de modo continuado.
- Periodicidad: se refiere a la regularidad de manifestación del efecto.
- Recuperabilidad: se define como la posibilidad de volver a las condiciones preoperacionales por medio de una intervención humana.

La estimación de la gravedad de un determinado impacto se realiza en base al grado de intensidad de las medidas correctoras que se requieren para corregir un determinado impacto ambiental. Se comienza la identificación y valoración de los impactos ambientales con los aspectos físicos y biológicos: en términos climáticos (y consecuentemente en la flora y en la fauna de la zona) el impacto ambiental es despreciable, dado que la planta se puede considerar prácticamente libre de huella de carbono (únicamente emite gases de efecto invernadero en la combustión de gas natural para la obtención de utilidades), partiendo del hecho de que se trataría de un proceso de industria verde al partir de una materia prima que procede de una fermentación de residuos de biomasa.

Además, no hay ningún tipo de emisión contaminante en explotación del proceso, debido a la propia naturaleza del proceso productivo; además, también se aplican las Mejores Técnicas Disponibles propuestas por el BREF correspondiente. Sumado a esto, su instalación en una zona altamente industrializada provoca que el efecto sobre la flora y fauna de la zona se vea disminuido a valores mínimos.

El resto de impactos contemplados en el inventario ambiental sí que tendrían una cierta repercusión en la zona. Con el propósito de seguir un orden lógico de los acontecimientos, se diferenciarán los efectos en fase de construcción y/o desmantelamiento con los efectos producidos durante la explotación de la instalación industrial.

Durante la etapa de construcción o desmantelamiento de la planta, la calidad del aire se ve ligeramente perjudicada debido a las obras destinadas al acondicionamiento del solar que implican la emisión de material particulado de diferente tamaño a la atmósfera. Asimismo, la utilización de vehículos para el desplazamiento de herramientas y medios auxiliares y el funcionamiento de maquinaria de obra civil requiere la combustión de un combustible fósil que emite gases de efecto invernadero al medioambiente.

El empleo de esta maquinaria pesada provoca una compactación del terreno que causa variaciones en la granulometría del suelo; además, se pueden provocar derrames en el transporte de materiales o fugas durante las obras, dañando el suelo sobre el cual se edificarán los cimientos encargados de soportar las instalaciones de la planta de producción. En esta fase de obras, las molestias inducidas por ruido también son un factor importante a tener en cuenta, principalmente para el bienestar de los operarios del Adjudicatario; finalmente, en esta etapa es altamente habitual la producción de aguas residuales procedentes del movimiento continuado de tierras profundas y operaciones de lavado.

En la etapa de explotación de la planta de producción de acetato de etilo los principales impactos se deberán a posibles fugas contingenciales de hidrógeno con compuestos orgánicos volátiles (acetaldehído, etanol y acetato de etilo), pudiendo generar atmósferas altamente inflamables. En adición a esto, también hay que considerar la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de la combustión de gas natural en las calderas y posibles infiltraciones al proceso que puedan derivar en la formación de aguas residuales, como aguas pluviales sucias.

Asimismo, en las operaciones de mantenimiento y limpieza pertinentes habrá que tener cuidado con posibles filtraciones al terreno. Para disminuir al máximo el impacto ambiental, la gestión de residuos se deriva a una empresa subcontrata experta en la materia, ya que las corrientes líquidas orgánicas brutas ricas en acetaldehído y acetaldol no son aptas para su vertido ni en el terreno ni en el cauce del río que alimenta al Polígono Industrial.

El único impacto que se puede asumir como positivo es en el contexto socioeconómico de la comarca con la generación de numerosos puestos de empleo tanto directos como indirectos. Atendiendo al estudio de mercado y a las aplicaciones presentadas en la Memoria, no es descabellado pensar que la instalación de la planta de acetato de etilo pueda atraer a otro tipo de industrias que empleen este producto como materia prima

bajo la consideración del gran número de parcelas libres que hay en el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro en la actualidad.

1.6 Medidas para la mitigación de impactos

Una vez introducidos los impactos más importantes, señalando las emisiones a la atmósfera, ruidos y generación de aguas residuales, se introducen algunas medidas de carácter general para minimizar el efecto de los impactos y gestionar o depurar las distintas corrientes contaminadas, tanto en fase de obra como en operación del proceso.

1.6.1 Medidas preventivas de carácter general

1.6.1.1 *Buenas prácticas generales de obra*

En fase de obra se deben llevar a cabo medidas para minimizar las molestias a la población y limitar posibles efectos a la calidad del aire, del suelo y del agua. Algunas de las buenas prácticas pueden ser evitar la realización de las operaciones de limpieza y mantenimiento de vehículos y/o maquinaria en la zona de obra para evitar derrames accidentales que puedan contaminar el suelo (realizarlo en las zonas destinadas a ello, como se indica posteriormente en el estudio básico de seguridad y salud), evitar la realización de ruidos innecesarios (disminuyendo principalmente la actividad en el horario nocturno, donde la legislación vigente es más restrictiva) y reducción de las emisiones a la atmósfera empleando maquinaria pesada que haya superado las pruebas pertinentes de mantenimiento técnico.

1.6.1.2 *Selección de suministradores y contratistas*

Hay que tratar de dar prioridad a aquellas candidaturas que, aparte de atractivo económico, ofrezca una mayor cantidad de garantías en cuestiones medioambientales. Los residuos generados durante la construcción y explotación han de ser gestionados en base a su clasificación: los residuos peligrosos, como el aceite térmico utilizado, han de ser devueltos al proveedor puesto que posee las técnicas óptimas para su post-tratamiento, además de habilitar una recompensa económica. Asimismo, los efluentes del proceso también se dejan en manos de una subcontrata especializada en el tratamiento de residuos; durante el tiempo que transcurre desde la producción del residuo hasta su gestión, éstos han de estar almacenados de manera adecuada en tanques que estén provistos de cubetos de retención para evitar derrames accidentales.

1.6.2 Medidas para la minimización del impacto atmosférico

Durante la fase de construcción se deben llevar a cabo las buenas prácticas que permitan disminuir lo máximo posible las emisiones de material particulado y polvo a la atmósfera, así como la minimización de la liberación de gases de efecto invernadero como subproducto de la combustión necesaria para el funcionamiento de la maquinaria.

En fase de operación, las medidas para la minimización del impacto atmosférico se han recogido en el apartado *1.3.2 Justificación de la tecnología implementada*, a través de

las Mejores Técnicas Disponibles recogidas en el apartado de impacto a la atmósfera recogidos en el documento BREF para la obtención de productos químicos a gran escala.

1.6.3 Medidas para minimizar el impacto en el suelo y en el agua

1.6.3.1 *Medidas preventivas generales en obra*

Con el propósito de minimizar el daño sobre los estratos que conforman el suelo de la zona y los depósitos y/o cauces de agua se aplicarán las siguientes medidas: especial cuidado en la limpieza de los vehículos y maquinarias de obra en los lugares habilitados para ello, prevención de depositar los sólidos en suspensión en aguas sin una etapa de decantación previa, revisión periódica de maquinaria y equipamiento y construir la instalación sobre un espesor suficiente de la solera de hormigón con el fin de evitar filtraciones al suelo.

1.6.3.2 *Prevención de fugas y derrames*

Los escapes de materiales suelen ser costosos en términos de pérdida de productos, operaciones de limpieza, saneamiento y eliminación de residuos, además del peligro que ello supone para la salud y el medioambiente. Por lo tanto, no solo es adecuado considerar únicamente los efluentes líquidos del proceso sino también fugas o derrames contingenciales que ocurran tanto en el interior como en el exterior de la batería de proceso.

Estos vertidos accidentales de producto químico y su posterior limpieza originan residuos y emisiones potencialmente peligrosas. La mejor filosofía de actuación consiste en prevenir estos sucesos: para anticiparse hay que cumplir una serie de medidas como almacenar los materiales más peligrosos en zonas donde la probabilidad de fuga sea menor o realizar estudios de prevención de fugas durante las fases de diseño y operación utilizando modelizaciones matemáticas.

1.6.3.3 *Tanques de almacenamiento*

Para evitar la contaminación de las aguas cercanas así como del suelo y de la atmósfera (en el caso de materiales volátiles), es recomendable tomar una serie de medidas como llenar los tanques siempre por la zona inferior, instalar alarmas de nivel alto y válvulas de seguridad en las líneas de alimentación que tengan sistema automático de cierre, colocación de un dispositivo de alivio para cuando se produzcan fenómenos de sobrepresión, instalación de cubetos en los alrededores para evitar derrames accidentales y disponer de zonas de carga y descarga de vehículos motorizados.

1.6.4 Sustancias peligrosas

En relación a las sustancias peligrosas presentes en el proceso de producción se ha de cumplir todo lo dispuesto por el Real Decreto 840/2015 (por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas) de 21 de septiembre, que tiene por objeto la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias sobre la salud humana, los bienes y el medioambiente.

Asimismo, también es conveniente tener en cuenta el Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el reglamento de almacenamiento de productos químicos así como sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ-1 (para almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles hasta MIE APQ-7 y las Mejores Técnicas Disponibles contenidas en el documento BREF de emisiones desde almacenamiento de julio del 2006.

1.6.5 Medidas para mitigación de los efectos del ruido

Como ya se ha indicado con anterioridad, los niveles de ruido serán inevitablemente más grandes en magnitud en la fase de construcción/desmantelamiento de la planta de producción debido al uso de maquinaria pesada y otros elementos como martillos neumáticos o apisonadoras. Afortunadamente, durante la fase de operación (mucho mayor en abanico temporal que la fase inicial de obras) los niveles de ruido son menores y se ven mitigados en el propio contexto de emplazamiento en un Polígono Industrial, alejados de núcleos poblacionales que se puedan ver perturbados.

Sin embargo, en ambos casos se ha de respetar la legislación vigente presentada en el apartado 1.4.2 *Molestias inducidas: ruido*. Algunas medidas para mitigar los niveles de ruido en la fase de obras son aumentar al máximo la fluidez del tráfico (el desplazamiento de vehículos es uno de los principales focos de contaminación acústico) y aislar en la medida de lo posible los equipos mecánicos de mayor impacto.

1.6.6 Medidas para evitar accidentes laborales

Bajo los principios de prevención de riesgos laborales se deben seguir las siguientes medidas para evitar accidentes que causen daños sobre operarios o personal de planta:

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales que tiene por objeto promover la seguridad y la salud de los trabajadores mediante la aplicación de medidas y el desarrollo de las actividades necesarias para la prevención de riesgos derivados del trabajo. Esta Ley establece los principios generales relativos a la prevención de los riesgos profesionales para la protección de la seguridad y de la salud, la eliminación o disminución de los riesgos derivados del trabajo, la información, la consulta, la participación equilibrada y la formación de los trabajadores en materia preventiva, en los términos señalados en la presente disposición.
- El Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención en relación con las condiciones de acreditación de las entidades especializadas como servicios de prevención ajenos a la empresa; se desarrolla a partir de la Orden del 17 de junio de 1997. Los artículos 11, 18, 23 y 25-28 se modifican por el Real Decreto 899/2015, de 9 de octubre y los anexos I, VII y VIII se modifican por el Real Decreto 598/2015, de 3 de julio. Asimismo, se deroga la disposición transitoria 3 y se modifican los artículos 2.4, 11.1, 15.5, 17-21, 23-30, 37.2 y la disposición final por el Real Decreto 337/2010, de 19 de

marzo. Asimismo, se modifica el artículo 4.1 y se añaden los anexos VII y VIII por el Real Decreto 298/2009, de 6 de marzo, y el artículo 22 por el Real Decreto 688/2005, de 10 de junio.

- El Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción (este RD no será de aplicación a las industrias extractivas a cielo abierto o subterráneas o por sondeos, que se regularán empleando normativa específica). Se llevan a cabo las siguientes variaciones: derogación del artículo 18 y modificación del artículo 19.1 mediante el Real Decreto 337/2010, de 19 de marzo; modificación de los artículos 13.4 y 18.2 por el Real Decreto 1109/2007, de 24 de agosto, y modificación del anexo IV por el Real Decreto 2177/2004, de 12 de noviembre.
- Los dos RD de 1997, el 39/1997 de 17 de enero por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención y el 1627/1997 de 24 de octubre por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción se ven modificados por el Real Decreto 604/2006, de 19 de mayo.
- El Real Decreto 780/1998, de 30 de abril, por el que se modifica el RD 39/1997 de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Servicios de Prevención.
- El Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, en el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves donde intervengan sustancias peligrosas.
- El Real Decreto 337/2010, de 19 de marzo, por el que se modifican el RD 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención; el Real Decreto 1109/2007, de 24 de agosto, por el que se desarrolla la Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el sector de la construcción y el Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en obras de construcción. Se dicta de conformidad la disposición final 1, estableciendo los criterios básicos sobre organización de recursos de los servicios de prevención por el Real Decreto 843/2011, de 17 de junio.

En aquellos casos que no se haya consultado de manera pormenorizada, es necesario incluir las modificaciones y derogaciones de artículos recogidas en las distintas publicaciones del Boletín Oficial del Estado. En otro orden de cosas, se debe realizar un análisis de riesgos para detectar los puntos donde haya una mayor probabilidad de sufrir un accidente y para mitigar el riesgo de accidentes debido al tráfico rodado se debe señalar el vial afectado, anunciando de manera clara las decisiones especiales tomadas.

1.6.7 Medidas para evitar explosiones e incendios

Una de las principales causas de incendio en explotaciones industriales se debe a cortocircuitos en el esquema eléctrico. Para tratar de evitar este caso, se debe diseñar y realizar la instalación eléctrica en conformidad con lo estipulado por el Reglamento

Electrotécnico de Baja Tensión que se recoge en el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, junto con las instrucciones técnicas complementarias BT 01-BT 59. Del mismo modo, la planta ha de cumplir con lo introducido en el Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales, cuyo objetivo es “conseguir un grado suficiente de seguridad en caso de incendio en los establecimientos e instalaciones de uso industrial”.

La regulación de las condiciones que deben cumplir los aparatos, equipos y sistemas, así como su instalación y mantenimiento, además de la regulación de los instaladores y mantenedores, está prevista en el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios, aprobado por el Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, y en la Orden de 16 de abril de 1998.

Según lo indicado en el Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz Básica (cuyo objetivo es establecer los criterios mínimos que habrán de observar las distintas Administraciones públicas y los titulares de los establecimientos para la prevención y el control de los riesgos de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas) de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, las instalaciones están obligadas a elaborar un Plan de Emergencia Interior que “comprenda el análisis y la evaluación de los riesgos, el establecimiento de los objetivos de prevención, la definición de los medios corporativos humanos y materiales necesarios para la prevención y control, la organización de éstos y los procedimientos de actuación ante emergencias que garanticen la evacuación y/o confinamiento e intervención inmediatas, así como su integración en el sistema público de protección civil”.

1.6.8 Medidas para la mitigación del impacto visual

Como ya se ha mencionado anteriormente en el presente Estudio de Impacto Ambiental, los efectos de la construcción y explotación de la planta sobre el impacto visual serán mínimos al construirse en una zona destinada a una alta industrialización. En el caso de ser explícitamente necesario, se mitigará el impacto visual en la fase de construcción empleando barreras que también restrinjan el acceso de personal no autorizado a la obra.

1.6.9 Medidas para reducir el impacto socioeconómico

El impacto socioeconómico del proyecto global se considera como positivo, por lo que no se incluyen medidas específicas para su mitigación. No obstante, según lo establecido en el artículo 9 del Real Decreto 1254/1999, los industriales de establecimientos en los que estén presentes sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores a las de la columna 3 de las partes 1 y 2 del Anexo I de dicho RD, tienen la obligación de facilitar a la autoridad un informe de seguridad.

Como se ha visto en el apartado *13.3 Clasificación de la instalación según Directiva Seveso* de la memoria, la planta se ve clasificada según este criterio; por lo tanto, en

base a este informe de seguridad se transmitirá el protocolo de actuación a la población en caso de emergencia dado que es importante que sea consciente de la importancia de la seguridad en los procesos químicos.

1.6.10 Desmantelamiento de la instalación

Cuando la instalación finalice su servicio se debe tener especial cuidado con la gestión de los residuos tóxicos o peligrosos, explicitando de manera clara los procedimientos de tratamiento para evitar la contaminación del medioambiente con el propósito de mitigar al máximo el impacto ambiental. Del mismo modo, es importante garantizar también la seguridad de los trabajadores durante las operaciones de desmantelamiento.

El procedimiento a seguir en las operaciones de desmantelamiento consiste en los siguientes trabajos: derribo mediante empuje o tracción, demolición con herramientas manuales, demolición con martillo rompedor sobre máquina, empleo de tenazas para facilitar la fractura, derribo por golpeo, fracturación, demolición por corte y perforación y desmontaje y desguace finales.

1.6.11 Matriz ambiental

Con el fin de identificar de manera gráfica los impactos más importantes señalados en el inventario ambiental (que se tratan de mitigar con las medidas introducidas en este apartado) se introduce una matriz de impactos en la tabla 6, también conocida como matriz de Leopold. Los impactos se designan mediante un código de colores: rojo para impacto negativo, blanco si no presenta efecto o si es despreciable y verde si supone un impacto positivo. Se diferencia entre las etapas de construcción y la etapa de explotación de la planta de producción de acetato de etilo.

Tabla 6: Matriz de Leopold simplificada para evaluar los impactos ambientales en la planta de acetato de etilo

	Fase de obra				Fase de explotación	
	Acondicionamiento de los terrenos del solar	Funcionamiento de maquinaria y medios auxiliares	Almacenamiento del material	Obras para construcción de la planta	Funcionamiento en condiciones nominales	Funcionamiento anómalo (contingencias)
Clima						
Calidad del aire						
Hidrología						
Flora y fauna						
Molestias por ruidos						
Impacto visual						
Socioeconomía						

1.7 Programa de vigilancia ambiental

El programa de vigilancia ambiental (PVA) es un documento que incluye la información necesaria e indica los procedimientos de obtención e interpretación de los datos para realizar el análisis que permita revisar la evolución de los valores que toman los parámetros ambientales y de los que se admitieron para la implantación del proyecto, tanto durante la fase de construcción como en explotación y desmantelamiento. Con este propósito, el PVA aglutina los siguientes procedimientos:

- Seguimiento y control de las diferentes actuaciones a desarrollar durante las obras de ejecución del proyecto considerado, tanto durante el periodo de obras (desde la firma del Acta de Replanteo del proyecto hasta el Acta de Recepción Provisional de la obra) como en el periodo de garantía de las mismas (un año completo desde la validez del Acta de Recepción Provisional).
- Seguimiento y control de las condiciones ambientales en la fase de explotación en un periodo variable.

Este programa de vigilancia ambiental ha de ser realizado por una entidad ajena a todas las implicadas en el diseño y construcción del proyecto. Sin embargo, ha de estar vinculada a la dirección de la obra e integrada en la asesoría ambiental de la misma con el fin de disponer de la información de la fuente primigenia. Para que el PVA se lleve a cabo se requieren:

- Medios humanos: las labores de seguimiento durante las obras las realizará un experto con los conocimientos necesarios sobre cuestiones medioambientales. Para la interpretación de datos y resolución de problemas contará con la ayuda de consultores especializados en cada uno de los temas de interés.
- Medios materiales: el equipo de supervisión ha de disponer de los materiales e instrumentos que se requieran para realizar las medidas de los parámetros ambientales pertinentes.

1.7.1 Ejecución y operación

La ejecución del PVA sigue un procedimiento algorítmico que simplifica los trabajos a realizar por los consultores, además de reducir el número de fallos cometidos. En la figura 2 se recoge esta metodología de manera gráfica:

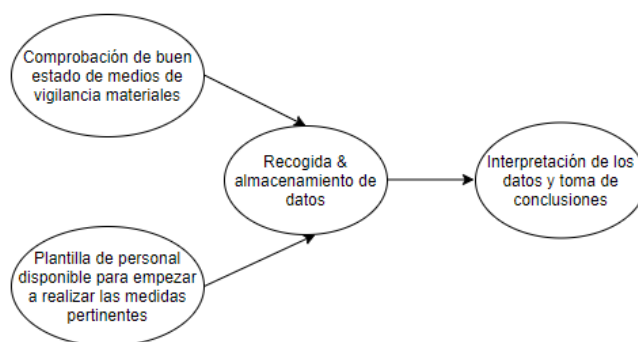


Figura 2: Diagrama de flujo para la ejecución del PVA (elaboración propia)

Se comienza realizando una puesta a punto de los instrumentos de vigilancia, comprobando que están en buen estado para la finalidad que se requiere y llevando a cabo la calibración de aparatos y compra de consumibles que se necesite. Simultáneamente es necesario cerrar la contratación de un plantel de expertos que se dedique en exclusiva a la ejecución de este programa de vigilancia ambiental.

Una vez cerrados los recursos materiales y humanos, ya se puede comenzar a tomar datos de forma periódica, que se almacenarán de la manera conveniente para su posterior interpretación. En función de los valores obtenidos y su comparación con los valores límites establecidos por la legislación vigente, se tomarán unas u otras decisiones que pueden suponer cambios en el protocolo de actuación tanto en la fase de obra/desmantelamiento como en la etapa de explotación de la planta de producción.

Este proceso es susceptible de recibir retroalimentación que auspice cambios y mejoras en el programa; la asesoría ambiental decidirá cuáles son las modificaciones que propician una mayor mejora que posibilite obtener mejores resultados optimizando tanto recursos materiales como humanos. Asimismo, en cada una de las etapas incluidas en el anterior diagrama de flujo es necesario elaborar una serie de documentos:

- Archivo de medios materiales: documento en el que se recoge toda la información en relación a los instrumentos que se van a utilizar en el programa. Se tienen que incluir hojas de especificaciones, información técnica de productos, recopilación de garantías...
- Diario de seguimiento ambiental: se recopila toda la información recogida en las observaciones, así como las posibles acciones correctoras que se han detectado como susceptibles de generar un impacto positivo. También es importante reflejar las incidencias que han tenido lugar para valorar de manera adecuada la recogida de datos. Este diario ha de estar disponible para las autoridades ambientales en todo momento.
- Informes-resumen periódicos: constituyen un resumen acerca de las observaciones realizadas y los resultados obtenidos, así como las conclusiones y recomendaciones realizadas por la asesoría ambiental en el programa de vigilancia ambiental. Se debe realizar, como mínimo, uno al mes durante la fase de obras y uno al año durante la fase de explotación.
- Informe anual de medidas correctoras: se refleja la eficacia, rendimiento y grado de implantación de las medidas correctoras. Este informe incluirá nuevas medidas si se produce insuficiencia en las medidas correctoras ya introducidas, si se están a producir nuevos impactos ambientales y si los nuevos avances tecnológicos permiten la aplicación de sistemas más eficaces.

1.7.2 Actividades de seguimiento

Para algunos de los factores introducidos en el inventario ambiental se enumeran las actividades de seguimiento que se realizan, así como otros datos de interés, con el fin de poder aplicar el programa de vigilancia ambiental.

1.7.2.1 *Clima*

- Aspectos y parámetros: variables climáticas (temperatura, precipitaciones, presión atmosférica, velocidad y dirección preferencial del viento).
- Objetivo: comprobar que la instalación de la planta no produce alteración alguna en el régimen micro-climático de la zona, comparando los parámetros en régimen preoperacional y tras un periodo largo de explotación de la instalación.
- Ubicación: los datos se recogen de las estaciones climáticas más cercanas. Los datos aparecen publicados por la Agencia Estatal de Meteorología.
- Medio de control: recopilación de los datos obtenidos.
- Duración y periodicidad: controles mensuales independientemente de la fase en la que se encuentre el desarrollo de la instalación.

1.7.2.2 *Calidad del aire*

- Aspecto y parámetros: calidad de la atmósfera en los alrededores de la planta (concentraciones en aire de gases de efecto invernadero y material particulado en suspensión generados en fase de obras).
- Objetivo: comprobar que la planta no produce ninguna alteración en la calidad del aire de la zona, comparado los resultados obtenidos con los valores habituales históricos.
- Ubicación: los datos se recogen en los puntos preferenciales de tráfico y funcionamiento de maquinaria en fase de obra y cerca de los focos de emisión en fase de operación.
- Medio de control: dispositivo medidor de la concentración de gases perjudiciales en el aire.
- Duración y periodicidad: control en continuo puesto que la calidad del aire es uno de los aspectos más importantes a la hora de cuantificar el impacto ambiental.

1.7.2.3 *Ruido*

- Aspecto y parámetros: nivel de ruido comprobando que no se supera el límite establecido por la normativa.
- Objetivo: comprobar que durante la fase de obra/desmantelamiento como durante la explotación de la planta no se produce ningún tipo de molestia sonora.
- Ubicación: datos recogidos con instrumentos que midan decibelios en el solar.
- Duración y periodicidad: mensualmente durante la realización de las obras y al comienzo de la actividad de la planta mientras no se produzcan incidencias.

1.8 Conclusiones

Finalizado el Estudio de Impacto Ambiental se adjunta este pequeño documento de síntesis donde se recogen las principales conclusiones a las que se han llegado. Como se ve gráficamente en la matriz de Leopold (tabla 6), la mayor parte de los impactos no son significativos siempre que se sigan las directrices generales de actuación introducidas con el propósito de mitigar los efectos de la instalación de la planta sobre el medioambiente.

Debido a la propia naturaleza del proceso de producción, los impactos ambientales en fase de explotación durante funcionamiento nominal son mínimos; de hecho, el impacto más destacable es el impulso positivo que otorga al contexto socioeconómico de la zona. De este hecho se concluye que la mayor precaución se ha de mantener en la fase de obra o desmantelamiento, en la que destacan los siguientes impactos ambientales:

- La emisión de material particulado a la atmósfera debido a las operaciones involucradas en el acondicionamiento del terreno y de gases de efecto invernadero como resultado de la combustión que alimenta la maquinaria utilizada.
- Las molestias inducidas por ruido por el empleo de maquinaria pesada y el desplazamiento de vehículos en el contexto de la fase de construcción.
- Generación de aguas residuales en las operaciones de mantenimiento y limpieza, que pueden filtrar hasta acuíferos y dañando el suelo sobre el que se sustenta la instalación.

Estos efectos adversos se pueden mitigar a través del programa de vigilancia ambiental, cuyo propósito último es la monitorización de todas las variables involucradas para justificar la implantación de medidas de protección.

2. Estudio básico de seguridad y salud

2.1 Introducción y antecedentes

El estudio básico de seguridad y salud es un documento similar al estudio de Seguridad y Salud, pero con un contenido simplificado, que forma parte del proyecto y que establece una previsión de los procedimientos, equipos y medios auxiliares a utilizar durante la realización de la obra, exponiendo los riesgos laborales previstos y las medidas a adoptar para evitarlos y/o reducirlos; se indicarán asimismo los servicios sanitarios a disponer en la obra.

Este estudio con entidad propia se introduce de acuerdo al Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción, en relación a lo indicado en su artículo 4 de obligatoriedad del estudio de seguridad y salud o del estudio básico de seguridad y salud en las obras. Este artículo obliga al promotor a que en la fase de redacción del proyecto se elabore este tipo de estudio en aquellos proyectos de obras en que se den algunos de los supuestos siguientes:

- Que el presupuesto de ejecución por contrata incluido en el proyecto sea igual o superior a 450 759.08 € (75 millones de pesetas).
- Que la duración estimada sea superior a 30 días laborales, empleándose en algún momento a más de 20 trabajadores simultáneamente.
- Que el volumen de mano de obra estimada, entendiéndose por tal la suma de los días de trabajo del total de los trabajadores de la obra, sea superior a 500.
- Que se trata de obras de túneles, galerías, conducciones subterráneas o presas.

En los proyectos de obras no incluidos en ninguno de los supuestos previstos anteriormente, el promotor estará obligado a que en la fase de redacción del proyecto se elabore un estudio básico de seguridad y salud.

No obstante, dada la condición académica del presente proyecto (Trabajo Fin de Grado para optar al Grado en Ingeniería Química) y en base a la información presentada en los otros documentos (memoria, cálculos justificativos, planos y presupuesto, entre otros), basta con realizar un estudio básico de seguridad y salud que deberá contener como mínimo:

- La justificación de la inclusión en el proyecto en vez de un Estudio de Seguridad y Salud, realizada en el párrafo anterior.
- La identificación y descripción de la obra y de las normas de seguridad y salud aplicables a los trabajos, ajustándose al tipo de obra a realizar.
- La identificación de los riesgos laborales que puedan ser evitados, indicando las medidas técnicas necesarias para ello.
- La relación de los riesgos laborales que no puedan eliminarse conforme a lo señalado anteriormente, especificando las medidas preventivas y protecciones

técnicas tendentes a controlar y reducir dichos riesgos y valorando su eficacia, en especial cuando se propongan medidas alternativas.

- Tendrá en cuenta también cualquier otro tipo de actividad que se lleve a cabo en la zona de obras y contendrá medidas específicas relativas a los trabajos que impliquen riesgos especiales para la seguridad y la salud de los trabajadores.
- Las previsiones e informaciones útiles para efectuar en las debidas condiciones de seguridad y salud los previsibles trabajos posteriores.

2.2 Objeto

Este estudio básico de seguridad y salud servirá como punto de partida a la empresa constructora para la elaboración del Plan de Seguridad y Salud, en el que se analizarán, estudiarán, desarrollarán y complementarán las previsiones respecto a la presencia de riesgos de accidentes y enfermedades profesionales, así como los derivados del trabajo de reparación, conservación y mantenimiento, y las instalaciones preceptivas de higiene y bienestar de los trabajadores.

Los objetivos que se pretenden alcanzar con el estudio básico de seguridad y salud se basan en las disposiciones mínimas en materia de seguridad con el fin de que el contratista cumpla con sus obligaciones en cuanto a la prevención de riesgos profesionales, según lo estipulado por el Real Decreto 1627/1997. Se detallan a continuación:

- Evitar acciones o situaciones peligrosas por improvisación, insuficiencia o falta de medios.
- Garantizar la salud e integridad física de los trabajadores.
- Delimitar y esclarecer atribuciones y responsabilidades en materia de seguridad de las personas que intervienen en el proceso constructivo.
- Determinar los costes de medidas de protección y prevención.
- Referir la clase de medidas de protección a emplear en función del riesgo.
- Detectar a tiempo los riesgos que derivan de la ejecución de la obra.
- Aplicar técnicas de ejecución que reduzcan al máximo estos riesgos.

2.3 Características de la obra

La obra a realizar se corresponde con la construcción de una planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol (procedente de Bioetanol Galicia) en el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro, ayuntamiento de Curtis, en la provincia de A Coruña.

El proceso de construcción consta de una serie de etapas claramente diferenciadas: reconocimiento de la zona por el Contratista (acompañado de la Propiedad o de la Dirección Técnica de Obra), organización previa de los trabajos, licencias de ocupación de la calzada y permisos de obra, organización de la zona de obra y desarrollo de los trabajos.

En los puntos sucesivos de descripción de características de la obra se diserta de manera breve acerca de la utilidad de estas etapas, junto con las medidas llevadas a cabo en cada una de ellas. Asimismo, se introducen otros aspectos relacionados con la obra como son los materiales, maquinaria, limpieza o mantenimiento.

2.3.1 Puesta en marcha, documentación y trámites previos

El inicio de la obra requiere que se hayan cumplimentado una serie de trámites administrativos previos que acrediten que la actividad es conforme a la legislación que le aplica en materia de PRL (prevención de riesgos laborales). Algunos de los trámites a llevar a cabo a lo largo de esta fase son:

- Libro de Subcontratación con el fin de indicar las empresas que intervienen en la realización de la obra acreditando que cumplen con los niveles de subcontratación permitidos. Deberá mantenerse actualizado a lo largo del desarrollo de los trabajos.
- Tramitación del Aviso Previo de la obra, siendo el promotor de la obra el encargado de avisar a la autoridad laboral.
- Redacción del Plan de Seguridad y Salud por la empresa contratista, siguiendo las directrices estipuladas por el Real Decreto 1627/1997.
- Redacción y visado del estudio básico de seguridad y salud como punto inicial para el diseño de la acción preventiva.
- Designación del Coordinador de Seguridad y Salud, que ha de ser el promotor de la obra según RD 1627/1997 de 24 de octubre.
- Aprobación del Plan de Seguridad y Salud por el Coordinador de Seguridad y Salud.
- Tramitación de la apertura del centro de trabajo, que permitirá finalmente el inicio de la actividad.

Toda esta tramitación ha de realizarse con anticipación al inicio de los trabajos para evitar la aplicación de pólizas de seguro en caso de accidente o siniestro, además de sanciones administrativas. Resulta asimismo fundamental considerar una potencial modificación de estos trámites a raíz de la entrada en vigor de nueva normativa legal.

2.3.2 Reconocimiento de la zona por el Adjudicatario

El Adjudicatario visitará la obra con personal de la Propiedad con el propósito de comprobar si se dispone de los medios, maquinaria y personal adecuados para la realización de la obra. También se tratará de realizar un presupuesto coherente en base a todos los procedimientos necesarios para la realización íntegra de la obra.

Esta primera visita del Adjudicatario le proporcionará una idea real acerca de los distintos trabajos que debe realizar para acometer la obra, alejándose de generalidades.

2.3.3 Organización previa de los trabajos

Una vez realizada la primera visita a la zona de obras, el Adjudicatario se ha de reunir con la Dirección Técnica y el Coordinador de Seguridad y Salud en fase de ejecución (el promotor de la obra) para elaborar el plan de actuación correspondiente a cada tipo de obra.

En esta fase, el Adjudicatario deberá indicar su planificación de los trabajos a realizar (presentando un Diagrama de Gantt, por ejemplo) para así evaluar los riesgos de las actividades que se van a cometer. También se deberán conseguir todos los documentos legales necesarios para poder llevar a cabo los trabajos, tales como licencias de ocupación.

2.3.4 Organización de la zona de obra y desarrollo de trabajos

Una vez conocida de manera profunda los procedimientos que requiere la realización de la obra (reconocimiento de la zona), evaluados los riesgos por parte del Adjudicatario (en la puesta común de información realizada en la organización previa de los trabajos) y conseguidas todas las licencias exigidas a nivel legal se tiene una idea del procedimiento de actuación a seguir. Con este punto medianamente claro, el siguiente paso consiste en la organización de la zona de obra:

- Accesos a la obra (tráfico rodado, personal, peatones...)
- Interferencias con servicios afectados (agua, combustible...) que puedan estar vinculados a la realización de los trabajos.
- Adquisición y comprobación del material de construcción.
- Ubicación de la maquinaria necesaria para los trabajos de construcción.
- Provisión de extintores anti-incendios en toda la obra.
- Accesos de maquinaria pesada, como grúas, utilizadas a la hora de localizar la maquinaria en las instalaciones.

Una vez organizada la zona de obra se desarrollan los trabajos relativos a cimentaciones, colocación de anclajes y depósitos, montaje de equipos y tuberías, soldadura y comprobación por estudios radiográficos y colocación de válvulas, accesorios y equipos de instrumentación & control. Asimismo, en la obra se van a encontrar vallas, maquinaria pesada -como grúas autopropulsadas y camiones-, pequeña maquinaria y herramientas.

2.3.5 Tráfico rodado

En relación con la manera de realizar las ocupaciones, no se podrá cortar ninguna calle hábil ni producir estrechamientos en las calzadas superiores a 3 metros libres. Sin embargo, todo esto es susceptible de cambios con consentimiento de la autoridad potestativa, bien sea el Ayuntamiento o la Comunidad de Vecinos correspondiente. Del mismo modo, en las ocupaciones que afecten a las aceras y pasos de peatones será obligatorio instalar barandillas de protección para proteger a los usuarios de la zanja o excavación.

Se delimitarán los espacios destinados a la circulación de la maquinaria y camiones por toda la obra en función de las distintas actividades a realizar y se independizarán las zonas de circulación de vehículos y de personal de obra empleando cintas de señalización y vallado de obra. Cada cierta distancia, para facilitar la circulación y delimitado de las diferentes zonas se colocarán balizamientos luminosos, especialmente útiles en el supuesto de poca luz natural.

Cuando se prevea que en la circulación interna de obra así como en el acceso y salida de vehículos a la vía exterior se generen puntos conflictivos, se emplearán señalizadores que faciliten la circulación, pudiendo delegar estas funciones en un empleado de obra. En el caso de que se produzca una contingencia, se señalizará y marcará la zona afectada con los medios que se consideren necesarios.

2.3.6 Oficios, medios auxiliares y maquinaria para la realización de la obra

Las actividades de obra cuya intervención es objetivo de la prevención de riesgos laborales son: albañilería y pequeñas obras para el acondicionamiento del solar, montadores y maquinistas.

Del análisis del Proyecto, de las actividades de obra y de los oficios que son objetivo de prevención de riesgo laboral se estima la utilización de andamios, escaleras de mano, cuerdas y cables como medios auxiliares, que han de ser comprados o alquilados por el Adjudicatario o por algún subcontratista bajo su control directo; es importante mantener estos medios de apoyo en buen estado técnico para evitar funcionamientos erróneos, accidentes o cualquier otra contingencia negativa en términos de seguridad.

La maquinaria necesaria para la realización de la obra se basa en camiones de transporte de materiales, camión para carga de material de desecho, grúa autopropulsada para la elevación y descarga de equipos, herramientas en general (radiales, cizallas y cortadores), rozadora eléctrica, compresor móvil y pistón mecánico. Al igual que en el caso de los medios auxiliares se supone un alquiler de larga duración realizado por el Adjudicatario, con la obligación de mantener la maquinaria en el mejor estado posible.

2.3.7 Superficie destinada a acopios y talleres

De primeras resulta complicado establecer las zonas previstas para acopios de materiales y talleres en obra; aun así se considerarán unas áreas con el objetivo de entorpecer lo menos posible dentro del recinto de la obra. Sin embargo, no se establecerán áreas para talleres a no ser que por características inherentes de la obra a realizar fuera necesaria su instalación, indicando el lugar idóneo para su posible ubicación.

2.3.8 Métodos de recogida de escombros durante realización de la obra

Un empleado será designado para recoger los escombros y desechos que se generen en cada sección durante la ejecución de la obra; posteriormente, uno o varios camiones volquete transportarán los escombros para depositarlos en los lugares habilitados, generalmente localizados al lado de las casetas de obras. Parte de estos escombros se

podrán quemar al final de cada jornada laboral, disponiendo la zona de obra de un recinto aislado para esta función. El resto de desperdicios serán trasladados por carretera a un vertedero.

A todos los operarios se les inculcará la filosofía de depositar los escombros en las zonas habilitadas durante el proceso de formación en temas de seguridad. Para comprobar que esta medida se cumple, el vigilante de seguridad realizará rondas de comprobación al menos una vez a la semana. El encargado del acopio de escombros será el responsable de que se cumpla esto donde corresponde, mientras que el vigilante de seguridad será el encargado de que se recopilen todos los escombros en los lugares indicados en los planos de seguridad.

2.3.9 Aparcamiento, reparación y mantenimiento de maquinarias y equipos móviles

El Adjudicatario, en convenio con el Coordinador de Seguridad y Salud, habilitará un lugar en la obra para que se puedan estacionar, mantener, revisar y reparar en cualquier momento la maquinaria de obra y equipos auxiliares. En caso de ser posible, es recomendable disponer de dos lugares independientes con el propósito de destinar uno de ellos a maquinaria pesada (excavadores, retropalas, rodillos autopropulsados o camiones) y otro espacio dispuesto a equipos y maquinaria auxiliar.

Estos lugares estarán situados en puntos totalmente separados de la obra y bien comunicados para un fácil acceso a la zona de trabajo y al exterior con el fin de que no se entorpezca el funcionamiento de la maquinaria en movimiento. El perímetro de estas zonas se vallará y se distinguirá con señales identificativas. En su interior se asignará una parte cubierta para evitar que fenómenos meteorológicos como la lluvia obstaculice las reparaciones.

En los talleres de reparación se recomienda el empleo de un pavimento de hormigón o de conglomerado asfáltico; dentro de este recinto, la maquinaria se estacionará de forma agrupada en función de su morfología, tamaño o régimen de funcionamiento. Habrá un operario encargado de la vigilancia y control del acceso a dicho recinto, ayudando en las labores de entrada y salida de maquinaria. En los planos del Plan de Seguridad y Salud se indicará el lugar designado para el estacionamiento, reparación y almacenamiento de maquinaria pesada y equipos auxiliares.

2.3.10 Almacenamiento y depósito de materiales y elementos de obra

Es necesario disponer de casetas de almacenamiento de materiales y elementos de obra en zonas a una distancia tal que sea factible su accesibilidad en caso de necesidad. El acopio se realizará a la intemperie, mas si se moja no se podrá usar hasta que seque por completo; no obstante, las maderas y materiales para los encofrados se guardarán en un local cerrado y protegido del exterior para evitar que se mojen, al igual que los sacos de cemento y mortero prefabricado.

Las tuberías se agruparán en función del tipo de material y en un local delimitado en todo su perímetro, a la intemperie. Se acopiarán en los paquetes de suministro por parte del proveedor, colocados de tal manera que se evite la caída de tubos que pudieren causar accidentes. La valvulería se almacenará en un local cerrado y protegido del exterior, agrupado por tipología; este local estará próximo a las casetas de los trabajadores para optimizar su accesibilidad.

Finalmente, si se emplean materiales tóxicos y/o inflamables para alguna actividad de la obra, se deben guardar en una caseta completamente independiente y de forma individual con su debido etiquetado.

2.3.11 Mantenimiento y limpieza de los servicios durante la obra

Es necesaria la elaboración y aplicación de un programa adecuado de orden y limpieza por parte del contratista mediante la contratación de un servicio ajeno dedicado a la limpieza de los comedores y de los vestuarios. Esta limpieza se efectuará dos veces al día por el servicio subcontratado, una después de la jornada de mañana y otra tras el final de la jornada laboral.

Para ayudar al servicio de limpieza el Adjudicatario puede nombrar a dos operarios de obra para auxiliar las operaciones en caso de posibles emergencias. Del mismo modo, se controlará el buen uso de las instalaciones así como su mantenimiento en previsión de posibles reparaciones y conservación. Este equipo de operarios será el responsable de su conservación y mantenimiento para evitar el abuso o posibles vicios perjudiciales en el uso de las instalaciones.

2.4 Identificación y análisis de riesgos en la obra

La identificación primigenia de riesgos se realizará para las obras necesarias para la construcción de la planta de producción de acetato de etilo -mediante deshidrogenación catalítica de etanol- a consecuencia de la tecnología y la organización previstas para construir; sin embargo, éstas pueden ser modificadas bajo la influencia del Adjudicatario, quien deberá reflejar los cambios en su Plan de Seguridad y Salud.

En todo caso, los riesgos analizados se disminuyen de manera significativa mediante la propuesta de soluciones constructivas, de organización, protecciones colectivas necesarias, equipos de protección individual (EPIs) y señalización para su eliminación (neutralización absoluta poco probable) o reducción a una de las tres siguientes categorías: riesgo *trivial*, riesgo *tolerable* y riesgo *moderado*.

El grado de éxito de los mecanismos de prevención propuestos dependerá del nivel de seguridad que se alcance durante la ejecución de la obra; en cualquier caso, el Plan de Seguridad y Salud que elabore el Adjudicatario ha de respetar las directrices básicas propuestas por el estudio básico de seguridad y salud aquí presentado.

2.4.1 Riesgos detectables más comunes

De manera general, los riesgos más comunes que se pueden detectar a lo largo de la ejecución de una obra coinciden con lo que trasciende del propio sentido común; no es necesario ser ningún experto en la materia para realizar esta primera clasificación, donde triunfa la experiencia por encima del conocimiento.

2.4.1.1 *Movimiento de tierras*

Por movimiento de tierras se entiende la explanación, relleno y compactación de tierras. Los riesgos más importantes, entre muchos otros, son: desprendimiento descontrolado de materiales (tierra, piedras...), caídas a distinto/mismo nivel, vuelco de maquinaria, posibles accidentes durante la circulación de vehículos que acaben en atropellos de peones, accidentes por conducción en ambientes o terrenos adversos o inhalación de polvo o material particulado en suspensión.

2.4.1.2 *Encofrado y estructuras*

En este apartado se incluyen los riesgos específicos referidos a las actividades de cimentación mediante encofrados y preparación de estructuras auxiliares, donde destaca: sobreesfuerzos, pisadas sobre objetos punzantes, caídas a distinto/mismo nivel, dermatitis por contacto con el cemento, inhalación de polvo de cemento, cortes con bordes de las estructuras, vibraciones o ruido.

2.4.1.3 *Trabajos en altura*

Aquí se aglutinan las actividades realizadas sobre andamios y escaleras. Los riesgos principales son: caídas a distinto/mismo nivel, deslizamientos y resbalones, heridas por golpes o cortes, trabajos en condiciones ambientales adversas y riesgos a terceros por caída de objetos desde altura.

2.4.1.4 *Trabajos de albañilería*

Este apartado comprende los riesgos vinculados al trabajo con conducciones, valvulería e instrumentos de control. Destacan principalmente caídas a distinto o al mismo nivel, heridas por golpes o cortes y sobreesfuerzos.

2.4.1.5 *Trabajos de soldadura y oxicorte*

Se incluyen aquellos trabajos de soldadura que se llevan a cabo sobre superficies metálicas durante las obras que se involucran en la construcción de la planta de producción de acetato de etilo. Los principales riesgos asociados son: quemaduras en la piel, daño ocular, explosiones, choque eléctrico, cortes, exposición a humos y gases tóxicos y sobreesfuerzos.

2.4.1.6 *Instalaciones finales*

Aquí se engloban todas las actividades que pueden ser realizadas hasta la finalización de las obras, más allá de las hasta aquí comentadas, como la colocación de los elementos interiores, amueblado de la instalación o limpieza final. Los principales riesgos coinciden con los ya introducidos en su mayor parte, destacando sobreesfuerzos, caída de objetos

en altura, inhalación de polvo o material particulado, heridas por golpes o cortes y caídas al mismo/distinto nivel.

2.5 Medidas de prevención

Una vez introducidos los riesgos en la obra es conveniente adoptar medidas preventivas de seguridad con el propósito de menguarlos. Aquí se desarrollan las medidas de prevención que se deben tomar de manera justificada, los equipos de protección individual exigidos por Ley y las medidas de protección colectivas.

Los accidentes laborales suponen un coste humano y económico para tanto para el accidentado como para la empresa y la sociedad, de ahí que sea necesario dedicar una especial importancia a la prevención de riesgos laborales. Bajo estas fundamentaciones se justifica la formación previa del personal en cursos para que tenga conocimiento de los riesgos a los que se expone y tome conciencia de su prevención. Algunas de las medidas que se adoptan son:

- Verificación de conexiones.
- Todos los trabajos a realizar durante las operaciones de montaje se realizarán teniendo en cuenta las medidas de seguridad y cumpliendo la Ley de Prevención de Riesgos Laborales. Del mismo modo, las obras se ejecutarán respetando y protegiendo el medioambiente.
- Mantener limpias e iluminadas las zonas de movimiento de personal.
- Entrenamiento y simulación de los operarios para realizar trabajos con riesgo de atrapamiento, estableciendo unas directrices a seguir en caso de contingencia y asimilando el cumplimiento obligatorio de las mismas para efectuar una operación segura.
- Regar con frecuencia los caminos y cajas de los camiones para evitar polvaredas, con el propósito de eliminar el riesgo de trabajar en atmósferas saturadas de polvo.
- Construir dos accesos a la zona de obras, uno para la circulación de personas y otro para la de maquinaria y camiones, para neutralizar la posibilidad de atropellos de personas en estas secciones.
- Los vehículos subcontratados tendrán vigente la póliza de seguros con Responsabilidad Civil ilimitada, el carnet de empresa y los seguros sociales cubiertos antes de empezar los trabajos en la obra.
- Vigilancia continua de los bordes de excavación para evitar su sobrecarga.
- Señalización o balizamiento de las zonas con riesgo de atrapamiento para evitar en la medida de lo posible la presencia de personas en los alrededores.
- Señalización de las zonas de caída de cargas durante el transporte vertical.
- Prohibición de la realización de cualquier operación con riesgo de caída a diferentes alturas sin haber situado convenientemente la red de seguridad.

- Los tableros de madera, las barras de armaduras y otros componentes se amontonarán de manera cuidadosa, aplicando las medidas necesarias para impedir su desprendimiento descontrolado.
- Se fomentará un uso correcto y coherente de los equipos y medios auxiliares.
- Limpieza de escombros, según las directrices introducidas en el apartado 2.3.8 *Método de recogida de escombros durante realización de la obra*.
- Comprobar la buena calidad de los aislamientos.
- Señalización adecuada de los accesos y recorridos de las máquinas y vehículos, controlando consecuentemente los riesgos de colisión y atropello.
- Prohibición de la marcha atrás de los camiones con la caja de contenido levantada o durante la maniobra de descenso de la misma tras el vertido de tierras, especialmente crítica cuando se dispone de tendidos eléctricos aéreos en las proximidades.
- La maquinaria y los vehículos alquilados o subcontratados serán revisados por las autoridades competentes para comprobar que están en capacidad de pleno funcionamiento antes del su traslado a obra, exigiéndose el libro de mantenimiento y el certificado que acredite su revisión por un taller cualificado.
- Vigilancia permanente de que los cierres de acceso público a la obra permanecen cerrados para que nadie ajeno al personal contratado por el Adjudicatario pueda acceder sin permiso.
- Inspecciones previas del lugar de trabajo, según lo estipulado en el apartado 2.3.2 *Reconocimiento de la zona por el Adjudicatario*.
- Fomentar la filosofía de sujeción adecuada antes de izar cualquier carga. Si se deben erguir cuerpos alargados, se utilizará la fijación por dos puntos.
- Instalación de vallas de seguridad en los lugares desde los cuales se pueda caer al vacío.
- Se dispondrán caminos especiales para acceder a los puntos de encofrado u hormigonado y se circulará a través de ellos con un arnés de seguridad provisto de una anilla que permita desplazarse por un cable horizontal bien sujeto.

2.5.1 Equipos de protección individual (EPIs)

Este punto del estudio básico de seguridad y salud se introduce en base al Real Decreto 773/1997 de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual, que a su vez se asienta sobre la Ley 31/1995 de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, que determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz. Según el artículo 6 de esta Ley serán las normas reglamentarias las que irán fijando y concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas.

A efectos del Real Decreto 773/1997, se entiende por equipo de protección individual “cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin”. Se excluyen de esta definición los siguientes atuendos:

- La ropa de trabajo corriente y los uniformes que no estén específicamente destinados a proteger la salud o la integridad física del trabajador.
- Los equipos de los servicios de socorro y salvamento.
- Los equipos de protección individual de los militares, de los policías y de las personas de los servicios de mantenimiento del orden.
- Los equipos de protección individual de los medios de transporte por carretera.
- El material de deporte.
- El material de autodefensa o de disuasión.
- Los aparatos portátiles para la detección y señalización de los riesgos y de los factores de molestia.

Todos los EPIs dispondrán del marcado “CE” de forma visible, legible e indeleble durante el periodo de duración previsible o de vida útil, diseñadas según la figura que se incluye en el Real Decreto 159/1995 de 3 de febrero con el que se modifica el Real Decreto 1407/1992 de 20 de noviembre, por el que se regula las condiciones para la comercialización y libre circulación intracomunitaria de los equipos de protección individual. El diseño se muestra en la figura 3.



Figura 3: Marcado CE obligatorio para EPIs (Anexo IV Real Decreto 159/1995 de 3 de febrero)

En aplicación a lo expuesto en el RD 773/1997, el Adjudicatario estará obligado a determinar los puestos de trabajo en los que deba recurrirse a la protección individual conforme a lo establecido en el artículo 4 (de criterios para el empleo de los equipos de protección individual) y precisar, para cada uno de estos puestos, el riesgo o riesgos frente a los que debe ofrecerse protección, las partes del cuerpo a proteger y el tipo de EPIs que deberán emplearse.

Asimismo, ha de elegir los EPIs conforme a lo dispuesto en los artículos 5 (de condiciones que deben reunir los equipos de protección individual) y 6 (elección de los equipos de protección individual), manteniendo disponible en la empresa la información pertinente a este respecto y facilitando información sobre cada equipo. Ha de proporcionar

gratuitamente a los trabajadores los equipos de protección individual que deban utilizar, reponiéndolos cuando resulte necesario y velar por que la utilización y el mantenimiento de los EPIs se realice a lo dispuesto en el artículo 7 (de utilización y mantenimiento de los equipos de protección individual) del Real Decreto.

A continuación se comentan los aspectos más relevantes de cada uno de los EPIs contemplados en el Anexo I del Real Decreto:

2.5.1.1 Protectores de la cabeza

Los protectores de la cabeza abarcan cascos de seguridad para obras públicas y construcción, minas e industrias diversas, cascos de protección contra choques e impactos, prendas de protección para la cabeza y cascos para usos especiales, contemplando la posibilidad de existencia de fuego y/o productos químicos.

Estarán constituidos con polietileno rígido, provistos de arnés regulable y bandas de amortiguación. En zonas con riesgo de caída de objetos sobre la cabeza será imprescindible su uso. La presencia de barboquejo es opcional en función de si la operación del operario implica agacharse o no. Los cascos estarán homologados según las condiciones impuestas por las Normas Técnicas de Prevención del Ministerio de Trabajo MT-1.

2.5.1.2 Protectores del oído

Los protectores del oído agrupan tapones, orejeras con arnés bajo la barbilla o la nuca, cascos antirruído, protectores auditivos acoplables a los cascos de protección para la industria, protectores auditivos dependientes del nivel y protectores auditivos con aparatos de intercomunicación. Para elegir correctamente el protector es necesario analizar y valorar el riesgo de ruido, determinando los valores y los tiempos de exposición de los trabajadores.

Por ello, se pueden clasificar los protectores del oído en dos grandes clases: protectores externos u orejeras, que cubren totalmente el pabellón auditivo constando de dos casquetes y arnés de fijación con una almohadilla absorbente y un cojín para la adaptación a la oreja y protectores internos o tapones, que se introducen en el canal externo del oído; aun así su poder de atenuación es menor que el de las orejeras, aunque son más fáciles de transportar, confortables y facilitan el movimiento en el trabajo.

2.5.1.3 Protectores de los ojos y de la cara

Principalmente, gafas de montura (bien universal, integral o de “cazoletas”), pantallas faciales y pantallas para soldadura (de mano, de cabeza o acoplables a casco de protección para la industria).

Las gafas se utilizarán en trabajos con riesgo de impacto de partículas, susceptibles de material particulado, atmósferas contaminadas... Estas gafas de protección tendrán, además de unos oculares de resistencia adecuada, un diseño de montura y unos elementos adicionales con el propósito de proteger el ojo en cualquier dirección.

Las pantallas de protección faciales se emplearán en labores que consistan en soldadura. El armazón está fabricado en materiales opacos a las radiaciones, provistos de filtros u oculares filtrantes adecuados a la intensidad de las radiaciones existentes en el lugar de trabajo. En la parte posterior llevará un cobertor en el filtro cuya misión es la de preservar posibles riesgos mecánicos y detrás del filtro un autocristal destinado a preservar el ojo del trabajador contra partículas que puedan existir en el ambiente laboral.

2.5.1.4 Protección de las vías respiratorias

Destacan equipos filtrantes de partículas molestas, nocivas, tóxicas o radioactivas, equipos filtrantes frente a gases y vapores, equipos filtrantes mixtos, equipos aislantes de aire libre, equipos aislantes con suministro de aire, equipos respiratorios con casco o pantalla para soldadura, equipos respiratorios con máscara amovible para soldadura y equipos de submarinismo.

Básicamente tienen la función de proporcionar al trabajador que se encuentra en un ambiente contaminado el aire que precisa para respirar en debidas condiciones higiénicas. Se usan en todos los trabajos donde se produzca material particulado o polvo que pueda afectar a las vías respiratorias tales como picado con martillos neumáticos, uso de rebarbadoras, mesas de corte circular... Las mascarillas estarán formadas por su cuerpo además del arnés de sujeción de dos bandas ajustables y válvula de exhalación, debiendo estar homologadas según las Normas Técnicas de Prevención del Ministerio de Trabajo MT-13 2.4.2.

2.5.1.5 Protectores de manos y brazos

Guantes contra las agresiones mecánicas (perforaciones, cortes, vibraciones), guantes contra las agresiones químicas, guantes contra las agresiones de origen eléctrico, guantes contra las agresiones de clase térmico, manoplas, manguitos y mangas. Estarán confeccionados en materiales naturales o sintéticos, no rígidos, impermeables y de características mecánicas adecuadas. Se deberán descartar aquellos con orificios, grietas o cualquier deformación o imperfección que merme sus propiedades.

El tipo de guante de seguridad a emplear dependerá de la finalidad del trabajo a desempeñar y de la clase de productos manipulados. Los más utilizados son:

- Guantes para soldador: para trabajos de soldadura.
- Guantes aislantes para baja tensión: se utilizarán cuando se manejen circuitos eléctricos o máquinas que estén o tengan posibilidad de estar con tensión.
- Guantes de cuero: para manejar los materiales que normalmente se emplean en obra.
- Guantes de neopreno: cuando se manejan hormigones, moteros y yesos u otras sustancias tóxicas formadas por aglomerados hidráulicos.

2.5.1.6 Protectores de pies y piernas

Calzado de seguridad, calzado de protección, calzado de trabajo, calzado y cubrecalzado de protección contra el calor, calzado y cubrecalzado de protección contra el frío, calzado frente a la electricidad, calzado de protección contra motosierras, protectores amovibles del empeine, polainas, suelas amovibles (antitérmicas, antiperforación o antitranspiración) y rodilleras.

Estas botas reforzadas de seguridad se clasifican en base a dos tipos: botas reforzadas, compuestas por la bota propiamente dicha, hecha en cuero, con la puntera reforzada interiormente con plancha metálica que impida el aplastamiento de los dedos en caso de caída de objetos pesados sobre ellas y suela metálica que impida el paso de los elementos punzantes a su través, revestida exteriormente con el suelo antideslizante. Han de diseñarse frente al impacto cuando se ensaya con un nivel de energía de 200 J y botas impermeables, compuestas por material de caucho o goma en una sola pieza, revestidas en el interior con felpilla que recoja el sudor. Se utilizarán en trabajos en los que exista agua o humedad, siendo obligatorio su secado cuando varíen las condiciones de trabajo.

2.5.1.7 Protectores de la piel

Cremas de protección y pomadas, especialmente importantes en manipulación con revestimientos, que son sustancias que pueden afectar a la piel o penetrar a través de ella y en trabajos de curtido.

2.5.1.8 Protectores del tronco y el abdomen

Chalecos, chaquetas y mandiles de protección contra las agresiones mecánicas, tales como perforaciones, cortes o proyecciones de metales en fusión. Chalecos, chaquetas y mandiles de protección contra las agresiones químicas, chalecos termógenos, chalecos salvavidas, mandiles de protección contra los rayos X, cinturones de sujeción del tronco y fajas y cinturones antivibraciones.

La ropa de protección también puede cubrir la totalidad del cuerpo, cumpliendo los siguientes requisitos: tejido ligero y flexible, que permitirá una fácil limpieza y desinfección. Se ajustará bien al cuerpo sin perjuicio de su comodidad y facilidad de movimientos y se eliminará en la medida de lo posible el uso de elementos adicionales como cordones, botones, partes vueltas cara arriba, etc... con el propósito de evitar enganches y la acumulación de suciedad.

Para la protección de los operarios contra el calor se emplearán trajes en cuero; contra el frío se utilizarán prendas a base de tejidos acolchados con materiales aislantes. Se dispondrán prendas de señalización tales como cinturones, brazaletes, guantes, chalecos... para ser empleados en lugares de poca iluminación, trabajos nocturnos y actividades donde existan riesgos de colisión o atropellos.

2.5.1.9 Protección total del cuerpo

Equipos de protección contra las caídas en altura, dispositivos anticaídas deslizantes, arneses, cinturones de sujeción, dispositivos anticaídas con amortiguador, ropa de protección, ropa de protección contra las agresiones mecánicas (perforaciones, cortes), ropa de protección contra las agresiones químicas, ropa de protección contra las proyecciones de metales en fusión y las radiaciones infrarrojas, ropa de protección contra fuentes de calor intenso o estrés térmico, ropa de protección contra bajas temperaturas, ropa de protección contra la contaminación radioactiva, ropa antipolvo, ropa antigás y ropa y accesorios de señalización reflectantes).

Explicitando en la protección anticaídas, los equipos se clasifican en tres clases diferentes: sistemas de sujeción, destinados a sujetar al trabajador mientras realiza un trabajo en altura (se empleará en aquellos casos en los que el usuario no necesita desplazarse, y el elemento de amarre del cinturón debe estar siempre tenso); sistemas anticaídas, que constan de un arnés, un elemento de amarre y una serie de conectores. Este dispositivo frena y detiene la caída libre de un operario, y con el fin de disminuir la caída libre se acortará el elemento de amarre. Finalmente, dispositivos anticaídas que constan de un arnés anticaídas y un sistema de bloqueo automático, que puede ser deslizante o retráctil.

Los cinturones utilizados pueden ser de tres tipos:

- Clase A: compuesto por una faja o arnés, con elemento de amarre y mosquetón de seguridad, provisto de una o dos zonas de conexión, teniendo que estar homologado de acuerdo con las Normas Técnicas de Prevención del Ministerio de Trabajo MT-9.
- Clase C: compuesto por una faja, arnés torácico, elemento de amarre con mosquetón de seguridad y dispositivo anticaídas. Se emplearán en trabajos que requieran un desplazamiento del operario de manera que no pueda permanecer a distancia constante del punto de amarre o cable fijador.
- Cinturón antivibratorio: compuesto por una faja de doble lona de sarga de algodón pegada, con objetos metálicos que permitan la transpiración y refuerzos de eskay (material sintético que imita al cuero) en zonas vitales. Éstos serán empleados por conductores de maquinaria en movimiento de tierras o camiones, así como operarios que deben utilizar de manera prolongada martillos perforadores o picadores neumáticos.

2.5.2 Medidas de protección colectivas

La disminución del riesgo no se conseguirá exclusivamente con la adecuada planificación y ejecución de protecciones individuales, sino que es necesario adoptar medidas y elementos protectores de carácter colectivo. Estas protecciones consistirán básicamente en señalizaciones de peligro, señalizaciones de zonas inseguras, pasarelas

para acceso a los andamios, zonas de paso protegidas o sistemas adecuados de iluminación.

Los elementos de protección colectiva permanecerán en todo momento instalados y en perfecto estado de mantenimiento. En caso de rotura o deterioro se deberán reponer con la mayor diligencia posible.

2.5.2.1 Movimiento de tierras

Con la finalidad de evitar el movimiento descontrolado de tierras se propone la prohibición de personal en los alrededores del radio de acción de la maquinaria en funcionamiento, restringiendo además su acceso a rutas previamente diseñadas y señalizadas. Se ha de mantener y cuidar también las vías de circulación, todo el personal que maneje vehículos o cualquier otra maquinaria debe estar en posesión de la correspondiente Certificación de Capacitación, revisar periódicamente los vehículos y maquinaria y restringir el transporte de personal fuera de la cabina de conducción del vehículo.

2.5.2.2 Encofrados y estructuras

Es imperativa una correcta señalización de los diferentes riesgos, prohibiendo la circulación de personal nuevamente dentro del radio de acción de la maquinaria. El desencofrado se realizará con la ayuda de uñas metálicas, las barras se almacenarán ordenadamente y no interceptarán pasos, las zonas de trabajos se mantendrán limpias y ordenadas, el camión hormigonera será calzado convenientemente durante el vertido del hormigón, se establecerán zonas de paso seguras para el personal encargado del vertido de hormigón, habrá un correcto equilibrio de andamios y otras estructuras que impidan su desplome y el consiguiente accidente y se tomarán medidas adicionales para evitar contingencias durante el trabajo con el cemento fresco e inestable.

2.5.2.3 Trabajos en altura

Verificación del correcto estado e instalación de los distintos medios empleados, capacitación y formación del personal y correcta señalización de los diferentes riesgos. Preferiblemente, el trabajo será llevado a cabo por equipos diseñados para tal fin; en caso de que tenga que ser realizado por personas, se valora la experimentación y se enfoca hacia una operación segura, empleando barandillas de protección en aquellos casos en los que la caída sea superior a 2 metros.

2.5.2.4 Trabajos de albañilería

Empleo de detectores de gases para detectar posibles fugas de tuberías subterráneas, colocación adecuada de tubos tratando de asegurar al máximo su sujeción para evitar posibles desplazamientos y realización de las señalizaciones oportunas para delimitar zanjas profundas, cuyo acceso ha de ser realizado con el equipamiento adecuado. También es importante conocer de manera detallada las estructuras de tuberías subterráneas que pudiere haber enterradas, con el propósito de evitar su afectación.

2.5.2.5 Trabajos de soldadura

Correcta capacitación y formación del personal, las botellas o bombonas se almacenarán en posición vertical, convenientemente separadas entre sí, y a cubierto de las inclemencias meteorológicas y empleo de sistemas de extracción local, ventilación general y protección sanitaria del personal según sea el caso. Queda terminantemente prohibido el uso de grasas en la manipulación de bombonas de oxígeno.

2.5.2.6 Instalación eléctrica

La instalación eléctrica ha de ajustarse a las directrices del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y ser realizado por un instalador homologado. Las tomas de corriente están provistas de neutro de enclavamiento y estarán blindadas. En los trabajos en condiciones de humedad muy elevada se requiere de un transformador portátil de 24V o protección mediante transformador de separación de circuitos.

Cuando existan líneas de tendido eléctrico aéreas que puedan afectar a la seguridad en la obra, será necesario desviarlas fuera del recinto de la obra o dejarlas sin tensión. Si esto no fuese posible, se colocarán barreras o avisos para que los vehículos y las instalaciones se mantengan alejados de las mismas.

2.5.2.7 Trabajos con maquinaria

Los trabajos y el movimiento de la maquinaria serán ejecutados en los límites señalizados para este fin. Se cumplirán siempre las normas del Reglamento de Seguridad en Máquinas para evitar accidentes, se mantendrán siempre en buen estado técnico y con una correcta limpieza; estos trabajos serán siempre realizados por operarios capacitados para ello.

Lo mismo es aplicable para herramientas y máquinas auxiliares, tratando en todo momento de evitar que el operario trabaje con más peso del recomendado.

2.5.2.8 Señalización

La señalización es una medida de carácter obligatorio para la prevención de los riesgos existentes en un emplazamiento y momento dados. Está regulada por el Real Decreto 485/1997 de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo, bajo el amparo de la Ley 31/1995 de 8 de noviembre.

Este RD establece las disposiciones mínimas para la señalización de seguridad y salud en el trabajo, sin afectar a la señalización para la comercialización de productos y equipos y sobre sustancias y preparados peligrosos, salvo que dicha normativa disponga expresamente otra cosa. El presente Real Decreto no será aplicable a la señalización empleada para la regulación del tráfico por carretera, ferroviario, fluvial, marítimo y aéreo, salvo que los mencionados tipos de tráfico se efectúen en los lugares de trabajo y sin perjuicio de lo establecido en el anexo VII, ni a la utilizada por buques, vehículos y aeronaves militares.

A efectos de este Real Decreto 485/1997 se define una señalización de seguridad y salud como “la señalización que, referida a un objeto, actividad o situación determinadas, proporcione una indicación o una obligación relativa a la seguridad o la salud en el trabajo mediante una señal en forma de panel, un color, una señal luminosa o acústica, una comunicación verbal o una señal gestual, según proceda”, siendo obligación del Adjudicatario el adoptar las medidas necesarias para que en los lugares de trabajo exista una señalización de seguridad y salud que cumpla lo establecido en los anexos I a VII del RD.

Asimismo, en términos de señalización gráfica los colores adoptan un importante significado, ya que podrán formar parte de una señalización de seguridad o constituirlos por sí mismos. En la tabla 7 se muestran los colores de seguridad, su significado y otras indicaciones sobre su utilización:

Tabla 7: Colores de seguridad y su significado (RD 485/1997 de 14 de abril)

Color	Significado	Indicaciones
Rojo	Señal de prohibición	Comportamientos peligrosos.
	Peligro-alarma	Evacuación, parada.
	Equipo de lucha contra incendios	Identificación y localización.
Amarillo	Señal de advertencia	Atención, precaución.
Azul	Señal de obligación	Acción específica
		Utilización de EPI
Verde	Señal de salvamento	Salidas, pasajes...
	Situación de seguridad	Vuelta a la normalidad

Los diferentes tipos de señales utilizados seguirán el código de colores aquí introducido. Se distinguen las siguientes:

- Señales de advertencia: poseen forma triangular, con un pictograma negro sobre fondo amarillo (el amarillo deberá cubrir como mínimo el 50% de la superficie de la señal) y bordes negros. Como excepción, el fondo de la señal sobre “materiales nocivos o irritantes” será de color naranja para evitar confusiones con otras señales similares empleadas para la regulación del tráfico por carretera. Se presentan en la figura 4.



Figura 4: Señales de advertencia (RD 485/1997 de 14 de abril)

- Señales de prohibición: se muestran en la figura 5, realizadas en forma de circunferencia con pictograma negro sobre fondo blanco con bordes y banda (transversal descendente de izquierda a derecha atravesando el pictograma a 45° respecto a la horizontal) rojos. Es obligatorio que este último color cubra como mínimo el 35% de la superficie de la señal.



Figura 5: Señales de prohibición (RD 485/1997 de 14 de abril)

- Señales de obligación: poseen forma redonda con pictograma blanco sobre fondo azul (el azul ha de cubrir como mínimo el 50% de la superficie de la señal), tal y como refleja la figura 6.



Figura 6: Señales de obligación (RD 485/1997 de 14 de abril)

- Señales relativas a los equipos de luchas contra incendios: con forma rectangular o cuadrada, desarrollando un pictograma blanco sobre fondo rojo, debiendo cubrir el rojo el 50% de la superficie de la señal. Se muestran en la figura 7.



Figura 7: Señales de lucha contra incendios (RD 485/1997 de 14 de abril)

- Señales de salvamento o socorro: forma rectangular o cuadrada. Pictograma blanco sobre fondo verde (el verde deberá cubrir como mínimo el 50% de la superficie de la señal), como se observa en la figura 8.

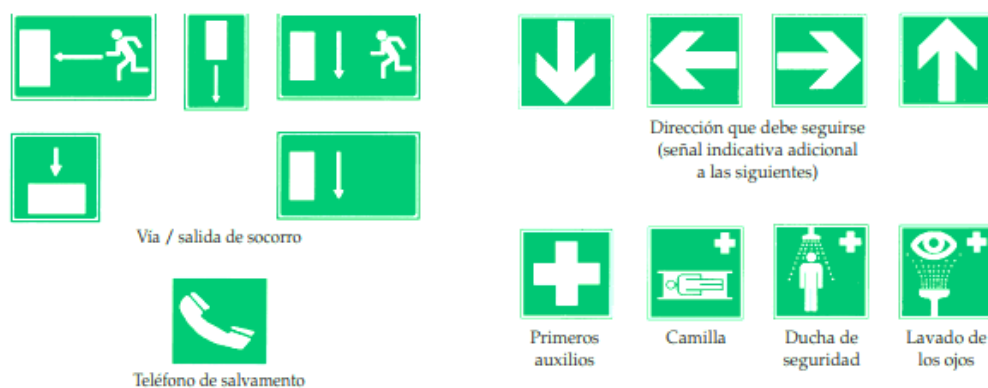


Figura 8: Señales de salvamento o socorro (RD 485/1997 de 14 de abril)

Para la señalización de desniveles, obstáculos u otros elementos que originen riesgos de caída de personas, choques o golpes y para la delimitación de aquellas zonas de los locales de trabajo a las que el trabajador tenga acceso con ocasión de éste, la señalización por color se efectuará mediante franjas alternas amarillas y negras. Las franjas deberán tener una inclinación aproximada de 45°, tal y como muestra la figura 9.



Figura 9: Señalización de riesgo de caídas, choques y golpes (RD 485/1997 de 14 de abril)

En lo relativo a señales luminosas y acústicas, la luz emitida por la señal deberá provocar un contraste luminoso apropiado respecto a su entorno, en función de las condiciones de uso previstas. Su intensidad deberá asegurar su percepción, sin llegar a producir deslumbramientos. La señal acústica deberá tener un nivel sonoro superior al nivel de ruido ambiental, de forma que sea claramente audible, sin llegar a ser excesivamente molesto. No deberá utilizarse una señal acústica cuando el ruido ambiental sea demasiado intenso; tampoco se deberán emplear dos señales acústicas simultáneamente. Si un dispositivo puede emitir señales acústicas con un tono o intensidad variables o intermitentes, o con un tono o intensidad continuos, se emplearán las primeras para indicar un mayor grado de peligro o una mayor urgencia de la acción requerida, en contraste con las segundas.

En lo tocante a las comunicaciones verbales, estas han de ser tan cortos, simples y claros como sea posible. La aptitud verbal del locutor y las facultades auditivas de los oyentes deberán bastar para garantizar una comunicación verbal segura. A modo de ejemplo:

- “Comienzo”: para indicar la toma de mando.
- “Alto”: para interrumpir o finalizar un movimiento.
- “Fin”: para finalizar las operaciones.
- “Izar”: para izar una carga.
- “Bajar”: para bajar una carga.
- “Avanzar, retroceder, a la derecha, a la izquierda”: para indicar el sentido del movimiento, debiendo coordinar de la manera adecuada los códigos gestuales.
- “Peligro”: para efectuar una parada de emergencia.
- “Rápido”: para acelerar un movimiento por razones de seguridad.

La información transmitida con señales verbales también puede ser transmitida por señales gestuales, en base a lo introducido en el Anexo VI del presente Real Decreto.

2.5.2.9 Protección contra caídas de personas de caídas y/u objetos

Para la protección de personas y objetos contra caídas existen determinados elementos de uso común, como tapas de aberturas (tableros que se colocan en los huecos

horizontales de servicios y patinejos), barandillas de protección (se colocan en el perímetro de huecos verticales y plataformas de trabajo siempre que exista un desnivel superior a 2 metros), redes de seguridad (sus dimensiones se ajustarán al hueco a proteger y estarán fabricadas en poliamida de elevada densidad) y escaleras portátiles, que serán preferentemente de aluminio o hierro y estarán dotadas de zapatas reuniendo las garantías necesarias de solidez, estabilidad y seguridad.

2.5.2.10 Andamios

Los andamios tendrán que armarse y organizarse de manera adecuada para garantizar su estabilidad y permitir que los trabajadores puedan permanecer en ellos con las debidas condiciones de seguridad. Antes de su primer uso, deberán ser sometidos a la práctica de un reconocimiento y a una prueba a plena carga por una persona competente; los más seguros son los de última generación fabricados en acero galvanizado. También es más seguro acceder a las plataformas de trabajo a través de escaleras de mano montadas entre ellas según los modelos así comercializados.

El andamio se montará con todos sus componentes. Los que no existieran serán solicitados al fabricante para su instalación. Los montadores se atenderán estrictamente a las instrucciones del manual de montaje y mantenimiento dados por el fabricante del modelo de andamios metálicos modulares a montar. La anchura del andamio será la necesaria para permitir una buena circulación de los trabajadores y el adecuado almacenamiento de las herramientas y materiales que se necesiten.

Las plataformas de trabajo estarán cercadas con barandillas perimetrales suministradas por el fabricante del andamio para tal función, con 100 cm de altura marcados por la barra que actúa como pasamanos, barra intermedia y rodapié de 15 cm, constituido por chapa o madera. Los componentes del andamio estarán libres de oxidaciones graves que tengan el potencial de mermar su resistencia. El andamio no se utilizará por los operarios hasta el momento en que el encargado de obra autorice el acceso al mismo una vez comprobada su seguridad.

2.5.2.11 Escaleras de mano

Los largueros serán de una sola pieza y estarán sin deformaciones evidentes (abolladuras). Estarán barnizados con pintura antioxidante y no presentarán uniones soldadas, añadiendo cualquier suplemento con los dispositivos considerados como adecuados.

Tendrán una longitud máxima de 5 m a salvar en altura; en su extremo inferior presentarán unas zapatas antideslizantes de seguridad y en su parte de apoyo superior estarán firmemente ancladas. Se colocarán de tal manera que su apoyo inferior diste de la proyección vertical del superior una cuarta parte de la longitud del larguero entre apoyos.

Cuando hay que salvar más de 3 metros de altura, el ascenso y descenso se efectuará dotando al operario de un cinturón de seguridad amarrado a un cable de seguridad paralelo. Nunca se transportará un peso igual o superior a 25 kg, y no se apoyará la escalera sobre superficies inestables como sacos, cajones, tablones...

2.5.2.12 Puntales

Los puntales se establecerán sobre durmientes de madera nivelados y aplomados. Los tablones durmientes de apoyo de los puntales que deban trabajar inclinados con respecto a la vertical serán acuñados; éstos se clavarán al durmiente y a la solapa para conseguir una mayor estabilidad. La superficie del lugar de apoyo estará perfectamente consolidada.

El reparto de la carga sobre las superficies apuntaladas se realizará uniformemente repartido. Los puntales estarán en perfectas condiciones de mantenimiento con ausencia de óxido, pintados con todos sus componentes. Carecerán de deformaciones en el fuste (abolladuras o torcimientos). Los puntales se izarán o descenderán en paquetes fijados por dos extremos suspendidos por eslingas.

2.5.2.13 Vallas

Los tipos de vallas a colocar serán de tres tipos: vallas de protección de peatones, valla de cerramiento de obra y valla de cabeza de vaciado. En función de la actividad a ejecutar se colocarán distintos tipos de vallas. El vallado de cerramiento de la obra tendrá una altura de 2 metros y se situará como mínimo a 1.50 m de la cabeza de la excavación, pudiendo permitir la visibilidad o ser ciegas.

Las vallas de protección del talud presentarán un pasamanos colocado aproximadamente a 90 cm de altura, un listón a 45 cm y un rodapié de 15 centímetros; todos los elementos estarán en perfectas condiciones, ya sean ejecutados en madera o acero. Esta valla deberá estar suficientemente apartada del borde para que no se produzcan desprendimientos de tierras en su colocación.

2.5.2.14 Cadenas

La carga máxima de trabajo de una cadena no debe superar una quinta parte de la carga de rotura efectiva. Se desechará cualquier cadena cuyo diámetro se haya reducido en más de un 5% por efecto del desgaste o que tenga algún eslabón doblado, aplastado o estirado. No se emplearán cadenas con deformaciones, alargamientos, desgastes, eslabones rotos...

Para su almacenamiento se emplearán caballetes y ganchos, con el propósito de evitar la presencia de humedad y/u oxidación. En presencia de frío se cargará menos de lo indicado, sobre todo cuando la temperatura sea inferior a 0°C. Asimismo, serán lubricadas convenientemente con el tipo de grasa recomendada por el fabricante.

2.5.2.15 *Eslingas*

En función del trabajo a realizar se utilizarán un tipo u otro de eslingas. Su resistencia varía en función del ángulo que forman los ramales entre sí; cuanto mayor sea el ángulo, menor será la carga que pueda resistir. Como norma general, no debe utilizarse un ángulo superior a 90°.

Es necesario comprobar el desgaste de las eslingas. Los nudos y las soldaduras disminuyen su potencial resistencia. Se inspeccionarán periódicamente y se sustituirán cuando se considere necesario. El almacenamiento se realizará sin estar en contacto con el suelo.

2.5.3 *Medidas preventivas de la maquinaria de obra*

Además de las medidas de carácter individual y colectivo se deben tener en cuenta ciertas consideraciones acerca de la maquinaria utilizada.

2.5.3.1 *Camión de transporte*

Todos los camiones estarán en perfectas condiciones de mantenimiento y conservación. Las operaciones de carga y descarga se efectuarán en los lugares señalados para tal efecto; antes de iniciar estas maniobras se instalará obligatoriamente el freno de mano y los calzos de inmovilización de las ruedas. Las operaciones de aparcamiento y salida de camiones serán dirigidas por un operario, así como las operaciones de carga y descarga.

El ascenso y descenso de las cajas de los camiones se efectuará mediante escalerillas metálicas dotadas de ganchos de inmovilización y seguridad, dotadas de gancho de inmovilización y seguridad. Las cargas se instalarán sobre la caja de forma uniforme compensando pesos. Las pistas interiores de circulación de camiones tendrán un ancho mínimo de 6 m y una pendiente máxima del 12% en tramos rectos y del 8% en tramos curvos. El colmo máximo permitido para materiales sueltos será con pendiente del 5%, debiendo protegerse la carga con una lona para evitar posibles desplomes.

2.5.3.2 *Camión grúa*

Antes de realizar cualquier trabajo se instalarán los calzos inmovilizadores en las cuatro ruedas y los gatos estabilizadores. Las maniobras de carga y descarga serán dirigidas por un especialista en prevención de riesgos laborales. Los ganchos de cuelgue estarán dotados de pestillos de seguridad. Se prohíbe sobrepasar la carga máxima fijada por el fabricante del camión, en función del brazo de grúa.

Las rampas de acceso de los camiones grúa no sobrepasarán el 20%. Se estacionarán a una distancia superior a 2 m del borde de cualquier corte en el terreno. Se prohíbe la permanencia de personas en torno al camión grúa a distancias inferiores a 5 m, impidiendo que ningún operario se sitúe bajo una carga suspendida.

2.5.3.3 Grúa autopropulsada

Queda expresamente prohibido el estacionamiento y desplazamiento de la grúa auto transportada a una distancia inferior a los 2 m del borde de las zanjas. En caso de ser necesaria una aproximación inferior a la citada se deberá entibar la zona de la zanja afectada por el estacionamiento del camión grúa, dotándose además al lugar de un tope firme y fuerte para la rueda trasera del camión para evitar los deslizamientos y vuelcos de la máquina.

Para evitar los riesgos catastróficos está previsto que el Encargado de obra controle que la puesta en estación y servicio de la grúa autopropulsada se realiza siguiendo las instrucciones dadas por su fabricante. En consecuencia, controlará el cumplimiento de las siguientes condiciones técnicas:

- No se izarán cargas sin antes haber puesto en servicio los calzos hidráulicos de apoyo de la grúa.
- El gancho simple estará dotado de pestillo de seguridad.
- El gancho doble se empleará estribando a ambos ganchos.
- Se vigilarán constantemente las variaciones posibles por fallo del firme durante las operaciones de carga y transporte de cargas suspendidas.

Con el propósito de mitigar la posibilidad de accidentes por maniobras erróneas, está previsto que las operaciones estén siempre guiadas por un especialista en prevención de riesgos; para evitar el riesgo de caída de personas por maniobras peligrosas se prohíbe expresamente caminar sobre el brazo telescópico de la grúa autopropulsada. Las maniobras de estacionamiento de la grúa autopropulsada serán guiadas por un operario destinado a tal efecto al que se dotará de los elementos para la realización de estas labores. La grúa estará correctamente estacionada atendiendo de manera especial a los siguientes aspectos:

- La grúa está perfectamente nivelada.
- Todos los gastos hidráulicos destinados a aumentar la base de apoyo de la grúa estarán desplegados en su totalidad.
- Ningún elemento de apoyo de la grúa estará cargando sobre algún elemento que presente debilidad estructural (tapas de arquetas de hormigón o fundición, zanjas recientemente abiertas o blandones del terreno) recabando de la propiedad información respecto alguna deficiencia de este estilo.
- Toda la zona de influencia de la grúa autopropulsada en sus movimientos estará libre de obstáculos. Además, ningún operario permanecerá en dicha zona.
- En el caso de que se invada la vía de circulación, se señalizará mediante la colocación de conos de balizamiento.

2.5.3.4 Compresores

Se ubicarán en los lugares indicados para ello en la obra. El movimiento del compresor por parte de los operarios se efectuará a una distancia nunca inferior a 2 m del borde de

cualquier corte del terreno. El transporte mediante eslingas se efectuará tomándolo de 4 puntos fijos del compresor, que quedará en estación con la lanza de arrastre en posición horizontal con las ruedas sujetas mediante tacos antideslizantes.

Durante su empleo, las carcasas permanecerán cerradas para evitar atrapamientos y ruidos. La zona dedicada en obra para la ubicación del compresor quedará acordonada en un radio de 4 m, instalándose señales de “obligatorio el uso de protectores auditivos” para sobrepasar la distancia de 4 metros. Los compresores a utilizar, si no son silenciosos, se ubicarán a una separación mínima de la zona de trabajo no inferior a 15 metros.

Las mangueras estarán siempre en perfectas condiciones de uso, sin grietas ni desgastes. Los mecanismos de conexión o empalme estarán unidos a las mangueras mediante racores de presión según cálculo. No se pasará con vehículos por encima de las mangueras, elevándolas si se considera necesario.

2.5.3.5 Motores eléctricos

Estarán provistos de cubiertas permanentes u otros resguardos adecuados dispuestos de tal manera que prevengan el contacto de las personas u objetos a no ser que sean de tipo cerrado o estén instalados en altura no inferior a 3 m sobre el suelo o estén en locales cerrados o exclusivos.

2.5.3.6 Apisonadoras

Antes de ponerlos en funcionamiento se revisará la colocación de todos sus elementos. Se evitarán los desplazamientos laterales. Las zonas en fase de compactación quedarán cerradas al paso mediante señalización, y el personal que realice su manejo conocerá perfectamente su funcionamiento.

2.5.3.7 Hormigonera eléctrica

Se situará en los lugares indicados para ello en la obra. Nunca se situarán distancias inferiores a 3 m del borde de la excavación. Las zonas donde se ubican quedan señalizadas mediante cinta o valla y una señal de peligro, así como un rótulo con la leyenda “prohibido el uso por parte de personal no autorizado”. Se dispondrá un camino de acceso fijo a la hormigonera para los camiones, separado del camino de las carretillas manuales. Se establecerá un entablado de un mínimo de 2 m de lado para superficie de estancia del operador de hormigoneras.

Estas hormigoneras estarán protegidas por una carcasa metálica para evitar el contacto con los operarios. Estarán dotadas de freno de basculamiento del bombo; la alimentación eléctrica se realizará de forma aérea a través del cuadro auxiliar en combinación con la tierra y los disyuntores del cuadro general eléctrico. La botonera de mandos eléctricos será de accionamiento estanco. El cambio de ubicación de la hormigonera a gancho de grúa se efectuará mediante el uso de un balancín que la suspenderá de cuatro puntos seguros. El personal encargado del manejo de la hormigonera mediante acreditación escrita de la constructora.

2.5.3.8 Máquinas y herramientas en general

Se considerarán las pequeñas herramientas tales como taladros, rozadoras, cepilladora metálica, sierras, radiales... Estas máquinas estarán protegidas por la carcasa y resguardos. Las reparaciones o manipulaciones se realizarán paradas y por personal especializado. Si se encuentran averiadas se señalarán con una señal de peligro que muestre “no conectar, equipo averiado”.

Las máquinas o herramientas con capacidad de corte tendrán el disco protegido mediante una carcasa anti-proyecciones. En ambientes húmedos, la alimentación de las máquinas no protegidas con doble aislamiento se realizará mediante conexión a transformadores de 24 voltios. Se prohíbe la utilización de estas herramientas por personal no especializado y no se dejarán herramientas de corte abandonadas en el suelo.

2.5.3.9 Instalaciones provisionales

Los cuadros principales y de distribución irán provistos de protección magnetotérmica y de relé diferencial con base de enchufe y clavija de conexión. Cualquier máquina conectada a un cuadro principal o auxiliar se efectuará a través de una manguera siempre con hilo de tierra incorporado.

Los cuadros eléctricos permanecerán cerrados y señalizados y únicamente serán manipulados por el personal especializado. Se situarán sobre patas soportes o colgarán pendientes de tableros de madera; las tomas de tierra se realizarán mediante picas hincadas en el terreno. Los trabajos necesarios para la instalación o reparación se realizarán dejando la línea que alimenta ese cuadro sin tensión.

El cuadro de mando irá provisto de relés magnetotérmicos para cada línea de distribución. Como cabecera de cada línea dispondrá de un interruptor diferencial y sensibilidad igual a 30 mA para alumbrado y 300 mA para fuerza. Cada toma de corriente alimentará a un único apartado, máquina o herramienta. Todos los conductores utilizados serán antihumedad y con aislamiento nominal de 1000 V como mínimo.

El tendido de mangueras se realizará a una altura de 2 m en lugares peatones y de 5 m en los de vehículos. El tendido de cables para cruzar viales de obra se efectuará enterrado. Se señalará el paso mediante una cubrición permanente de tabloncillos; asimismo, el cable irá protegido en el interior de un tubo rígido.

2.6 Normas de actuación preventiva

2.6.1 Seguridad durante la construcción

2.6.1.1 Obligaciones de las partes implicadas

La empresa constructora estará obligada a cumplir las directrices en el estudio básico de seguridad y salud a través de un Plan de Seguridad y Salud, coherente con los sistemas de ejecución que vaya a emplear. Asimismo, tendrá que cumplimentar las estipulaciones previas del estudio y el Plan de Seguridad y Salud respondiendo solidariamente de los

años que se deriven de la infracción del mismo por su parte o de los posibles subcontratas y empleados.

La Dirección Facultativa considerará el estudio básico de seguridad y salud como parte integrante de la ejecución de la obra correspondiente a la aprobación, el control y la supervisión de la ejecución del Plan de Seguridad y Salud, autorizando previamente cualquier modificación en éste dejando constancia por escrito en el Libro de Incidencias.

Además, se llevarán a cabo periódicamente las pertinentes certificaciones del Presupuesto de Seguridad y Salud, poniendo en conocimiento de la Propiedad y de los organismos el cumplimiento por parte de la empresa constructora de las medidas de seguridad contenidas en el estudio básico.

2.6.1.2 Medidas preventivas al inicio de los trabajos

Antes del comienzo de realización de los trabajos, el método de instalación y trabajo a seguir y los circuitos de circulación que afecten a la obra deberán estar aprobados por la Dirección Facultativa. Será necesario realizar un estudio de acondicionamiento de las zonas de trabajo para prever la colocación de plataformas, torres de paso y formas de acceso pudiendo emplearlos de forma conveniente.

El personal estará instruido sobre el uso adecuado de los equipos de protección individual para la realización de su trabajo. En los riesgos puntuales y esporádicos de caída de altura se emplearán obligatoriamente el cinturón de seguridad, ante la imposibilidad de disponer de la adecuada protección colectiva o de la insistencia de regulación con respecto a la integración de la seguridad en el proyecto de ejecución.

2.6.1.3 Medidas durante la realización de los trabajos

Durante la realización del trabajo, las zonas de trabajo y circulación deberán permanecer limpias, ordenadas y bien iluminadas. Las herramientas y máquinas estarán en perfecto estado, empleándose las más adecuadas para cada uso, siendo utilizadas por personal autorizado o experto a criterio del encargado de la obra.

Los elementos de protección colectiva permanecerán en todo momento instalados y en perfecto estado de mantenimiento, siendo necesario reponerlos en caso de rotura o deterioro. Además, la señalización será revisada a diario de forma que en todo momento permanezca actualizada a las condiciones reales de trabajo.

2.6.1.4 Protecciones personales

Durante la ejecución de todos aquellos trabajos que conlleven un riesgo de proyección de partículas se establecerá la obligatoriedad de uso de gafas de seguridad. De la misma manera, en aquellos trabajos que se desarrollen en entornos con niveles de ruidos superiores a los permitidos por la normativa vigente se deberán emplear protectores auditivos homologados según Norma Técnica MT-2. La totalidad del personal que desarrolle trabajos en el interior de la obra utilizarán cascos protectores que cumplan las especificaciones indicadas en la Norma Técnica MT-1 de cascos de seguridad.

Durante la ejecución de todos aquellos trabajos que se desarrollen en ambientes de humos de soldadura se facilitará a los operarios mascarillas respiratorias con filtro mecánico y de carbono activo contra humos metálicos. Como medida preventiva frente a golpes en extremidades inferiores se dotará al personal de calzado adecuado. Además, todos los operarios estarán obligados a utilizar cinturón de seguridad con arnés para aquellas operaciones en las que se realicen trabajos en altura.

2.6.1.5 Organización general de seguridad en obra

2.6.1.5.1 Comité de seguridad y salud: vigilante de seguridad

En las obras cuyo número de trabajadores exceda de 25 operarios debe constituirse un Comité de Seguridad y Salud formado por un técnico cualificado en materia de seguridad y que representa a la dirección de la empresa, dos trabajadores pertenecientes a las categorías profesionales o de oficio que más intervengan a lo largo del desarrollo de la obra y un Vigilante de Seguridad, elegido por sus conocimientos y competencia profesional en materia de Seguridad y Salud. Las funciones de este comité será las reglamentarias estipuladas en el artículo 8 de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Orden de 9 de marzo de 1971), destacando las siguientes a continuación:

- Promover la observancia de las disposiciones vigentes para la prevención de los riesgos profesionales.
- Informar sobre el contenido de las normas de Seguridad e Higiene que deban figurar en el Reglamento de Régimen Interior de la empresa.
- Realizar visitas tanto a los lugares de trabajo como a los servicios y dependencias establecidos para los trabajadores de la empresa para conocer las condiciones relativas al orden, limpieza, ambiente, instalaciones, máquinas, herramientas y procesos laborales, y constatar los riesgos que puedan afectar a la vida o salud de los trabajadores e informar de los defectos y peligros que adviertan a la Dirección de la empresa a la que propondrá la adopción de las medidas preventivas necesarias y cualesquiera otras que considere oportunas.
- Interesar la práctica de reconocimientos médicos a los trabajadores de la Empresa, conforme a lo dispuesto en las disposiciones vigentes.
- Velar por la eficaz organización de la lucha contra incendios en el seno de la empresa.
- Conocer las investigaciones realizadas por los Técnicos de la empresa sobre los accidentes de trabajo y enfermedades profesionales que en ella se produzcan.

Respecto al Vigilante de Seguridad (2 años de antigüedad en la empresa siendo por lo tanto un trabajador fijo de plantilla) establece que será el miembro del Comité de Seguridad que, delegado por el mismo, vigile de forma permanente el cumplimiento de las medidas de seguridad tomadas en la obra, que informará al Comité de las anomalías observadas y será la persona encargada de hacer cumplir la normativa de Seguridad estipulada en la obra, siempre y cuando cuente con facultades apropiadas. Aparte de

estas funciones específicas, cumplirá todas aquellas que le son asignadas por el artículo 9 de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo:

- Promover el interés y la cooperación de los trabajadores en orden a la Seguridad e Higiene del Trabajo.
- Comunicar por conducto jerárquico, o en su caso directamente al empresario, las situaciones de peligro que puedan producirse en cualquier puesto de trabajo y proponer las medidas que, a su juicio, deban adoptarse.
- Examinar las condiciones relativas al orden, limpieza, ambiente, instalaciones, máquinas, herramientas y procesos laborales en la Empresa, además de comunicar al empresario la existencia de riesgos que puedan afectar a la vida o salud de los trabajadores, con el propósito de que sean puestas en práctica las oportunas medidas de prevención.
- Prestar los primeros auxilios a los accidentes y proveer cuando fuera necesario para que reciban la inmediata asistencia sanitaria que el estado o situación de los mismos pudiera requerir.

Las funciones del Vigilante de Seguridad serán compatibles con las que normalmente preste en la empresa el trabajador designado al efecto. El nombramiento del Comité de Seguridad quedaría reflejado en un acta, debiendo entregarse copia de la misma a la Dirección Facultativa.

2.6.1.5.2 Coordinador en materia de seguridad y salud

Tanto durante la fase de redacción como en la fase de aplicación y control en obra del estudio básico de seguridad y salud deberá existir la figura del Coordinador en materia de Seguridad y Salud, que corresponderá al técnico competente designado por el promotor, quien debe elaborar y supervisar la correcta planificación y aplicación a los diferentes trabajos a desarrollar en las obras de los principios y tareas que se recogen y especifican en el estudio básico de seguridad y salud, tal y como se refleja en el Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre.

2.6.1.5.3 Parte de accidente y deficiencias

Respetándose cualquier modelo normalizado que pudiese ser de uso normal en la práctica del Adjudicatario, los partes de accidente y deficiencias observadas recogerán como mínimo los datos expuestos a continuación siguiendo una tabulación ordenada:

2.6.1.5.3.1 Parte de accidente

- Identificación de la obra.
- Día, mes y año en que se ha producido el accidente.
- Hora de producción del accidente.
- Nombre, categoría profesional, domicilio y oficio del accidentado.
- Lugar en que se produjo el accidente.
- Causas del accidente.
- Importancia aparente del accidente.

- Posible especificación sobre fallos humanos.
- Lugar, persona y forma de producirse la primera cura (médico, practicante, personal de obra).
- Lugar de traslado para la hospitalización.
- Testigos del accidente.

2.6.1.5.3.2 Parte de deficiencias

Se ha de incluir identificación de la obra, fecha en la cual se ha producido la observación, lugar donde se ha realizado la observación, informe sobre la deficiencia observada y plan de mejora de la deficiencia en cuestión.

2.6.2 Medicina preventiva y primeros auxilios

2.6.2.1 Botiquín de primeros auxilios

Se prevé la atención primaria a los accidentados mediante el uso de botiquines de primeros auxilios manejados por personal competente. Contendrán el material especificado en la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo en el artículo 43, relativo a instalaciones sanitarias. Se revisarán mensualmente y se repondrá inmediatamente lo usado; prestados los primeros auxilios por la persona encargada de la asistencia sanitaria la empresa dispondrá lo necesario para la atención médica consecutiva al enfermo o lesionado.

Cada botiquín contendrá como mínimo: agua oxigenada, alcohol de 96°, tintura de yodo, mercurocromo, amoníaco, gasas estériles, algodón hidrófilo, vendas, esparadrapo, antiespasmódicos, analgésicos y tónicos cardíacos de urgencia, torniquete, bolsas de goma para agua o hielo, guantes esterilizados, jeringuilla, hervidor, agujas para inyectables y termómetro clínico.

2.6.2.2 Reconocimiento médico

Con el fin de lograr evitar en lo posible las enfermedades profesionales en la obra, así como los accidentes derivados de los trastornos físicos, psíquicos, alcoholismo y resto de las toxicomanías peligrosas se prevé que el Adjudicatario y los subcontratistas, en cumplimiento de la legislación laboral vigente, realicen los reconocimientos médicos previos a la contratación de los trabajadores de la obra y los preceptivos de ser realizados al año de su contratación. Asimismo se ha de exigir este cumplimiento al resto de las empresas que sean subcontratadas por cada uno de ellos para la obra.

En los reconocimientos médicos, además de las exploraciones competencia de los facultativos, se detectará lo oportuno para garantizar que el acceso a los puestos de trabajo se realice en función de la aptitud o limitaciones físico-psíquicas de los trabajadores como consecuencia de los reconocimientos efectuados.

2.6.2.3 Evacuación de accidentados

La evacuación de accidentados, que por sus lesiones lo requieran, está prevista mediante la contratación de un servicio de ambulancias que el Adjudicatario definirá

exactamente a través de su Plan de Seguridad y Salud. La dirección y teléfono del Centro de Urgencias asignado estarán expuestos en un lugar visible para una rápida y efectiva asistencia a los accidentados.

2.6.2.4 Instalaciones de higiene y bienestar

Las instalaciones de higiene y bienestar se contemplan en base a lo presentado en el capítulo III de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el trabajo en sus artículos 38 al 42 (abastecimiento de agua, vestuarios y aseos, retretes, duchas y normas comunes de conservación y limpieza).

Todo centro de trabajo dispondrá de abastecimiento suficiente de agua potable en proporción al número de trabajadores, fácilmente accesible a todos ellos y distribuidos en lugares próximos a los puestos de trabajo. No se permitirá sacar o trasegar agua para la bebida por medio de vasijas, barriles, cubos u otros recipientes abiertos o cubiertos provisionalmente. Será necesario indicar mediante carteles si el agua es potable o no y no existirán conexiones entre el sistema de abastecimiento de agua potable y el de agua que no sea apropiada para beber, evitándose la contaminación por porosidad o por contacto.

Todos los centros de trabajo dispondrán de vestuarios y de aseo para uso del personal con una superficie mínima de dos metros cuadrados por cada trabajador y una altura mínima del techo de 2.30 metros, con asientos y armarios o taquillas individuales con llave para guardar la ropa y el calzado. Por excepción, en oficinas y comercios con plantilla inferior a 10 trabajadores, los vestuarios podrán ser sustituidos por colgadores o armarios que permitan guardar la ropa.

Los vestuarios o locales de aseo dispondrán de un lavabo de agua corriente, provisto de jabón, por cada 10 empleados o fracción de esta cifra y de un espejo de dimensiones adecuadas. La empresa ha de dotar toallas individuales y secadores de aire caliente y para aquellos trabajadores que realicen trabajos marcadamente sucios o manipulen sustancias tóxicas se les facilitarán los medios especiales de limpieza necesarios en cada caso.

El agua potable que se suministra a los distintos servicios será procedente de la red general de abastecimiento que exista en la zona. Los servicios higiénicos dispondrán de un lavabo, una ducha con agua fría y caliente y un retrete por cada diez trabajadores disponiendo de espejos y calefacción. Las dimensiones mínimas de las cabinas de letrinas serán de 1 metro por 1.20 m de superficie y 2.30 m de altura; las puertas impedirán totalmente la visibilidad desde el exterior y estarán provistas de un cierre interior y una percha. Los inodoros/urinarios se instalarán y conservarán en debidas condiciones de desinfección, desodorización y supresión de emanaciones.

En lo tocante a las duchas, éstas estarán aisladas, cerradas en compartimentos individuales con puertas dotadas de cierre interior. Estarán preferentemente situadas

en los vestuarios o en locales próximos a los mismos con la debida separación para uno y otro sexo; cuando las duchas no comuniquen con los vestuarios se instalarán colgantes para la ropa mientras los trabajadores se duchan. En los trabajos tóxicos o muy sucios se facilitarán los medios de limpieza y asepsia necesarios.

La limpieza y conservación de estos locales serán efectuadas por un servicio de limpieza subcontratado. El número de instalaciones sanitarias y la construcción e instalación de retretes estarán provistos de un sistema de descarga automática de agua o tratamiento químico; las tuberías y demás elementos de las instalaciones sanitarias deberán ajustarse a las prescripciones de las autoridades competentes. Las duchas y lavabos no deben emplearse para otro propósito que el original.

2.6.3 Mantenimiento preventivo

Las herramientas, máquinas y medios auxiliares deberán disponer del sello de Seguridad Comprobada (GS), certificado de AENOR u otro organismo equivalente de carácter internacional reconocido, o un certificado del fabricante, responsabilizándose de la calidad de los equipos y herramientas destinadas para su utilización en obra. Periódicamente se revisará la instalación eléctrica provisional de la obra corrigiendo los defectos de aislamiento y comprobándose las protecciones diferenciales y la toma de tierra.

En las máquinas eléctricas portátiles el usuario revisará diariamente los cables de alimentación y conexiones, así como el correcto funcionamiento de sus protecciones. Las herramientas manuales serán revisadas diariamente, reparándose o sustituyéndose cuando su estado denote un mal funcionamiento o represente un peligro para el usuario. Los accesos a la obra se mantendrán en buenas condiciones de visibilidad y en los casos que se considere oportuno se regarán las superficies transitadas para eliminar los ambientes pulvulentos.

2.6.4 Plan de emergencia

El Plan de Emergencia es un documento que establece los procedimientos de actuación en caso de accidente en la planta. Aquí se analizan los riesgos de la planta y se darán todos los procedimientos con nombramiento de las personas implicadas, además del plan de evacuación, punto de encuentro y avisos a organismos.

Esto permitirá una buena organización ante posibles situaciones de emergencia que se produzcan en la planta, además de minimizar las consecuencias.

2.6.5 Plan de Seguridad y Salud

El Adjudicatario está obligado a redactar un Plan de Seguridad y Salud adaptándose a este estudio básico de seguridad y salud. Este trabajo será enviado a la Administración con un informe favorable del Coordinador en materia de Seguridad y Salud para su aprobación. Antes de comenzar las obras, el Adjudicatario comunicará por escrito a la Dirección Facultativa el nombre del máximo responsable entre el personal que se

encuentre habitualmente en obra, quien tendrá en su poder una copia del Plan de Seguridad y Salud que se elabore.

El Plan de Seguridad y Salud a presentar, para su aprobación por el Coordinador en materia, debe incluir específicamente un Plan de Emergencia donde se detallen las actuaciones a desarrollar en el caso de un accidente o incendio. En concreto, se adjuntará como mínimo: nombre, teléfono y dirección del centro donde deben acudir los accidentados, teléfono de paradas de taxi, de cuerpos de bomberos y de ambulancias próximas.

Cuando tenga lugar algún accidente que requiera de asistencia facultativa, aunque sea leve y la asistencia médica se reduzca en una primera cura, se realizará una investigación del mismo y además de los trámites oficialmente establecidos; se entregará -como muy tarde dentro del día siguiente al accidente- un informe a la Dirección Facultativa de la obra en el que se incluya: nombre del accidentado, día, hora y lugar del accidente, descripción del mismo, causas del accidente, medidas preventivas para evitar su repetición y fechas límite para la adopción de medidas preventivas. La Dirección Facultativa podrá aprobar este informe o exigir la adopción de medidas complementarias no indicadas en el mismo.

2.6.6 Libro de incidencias

En cada centro de trabajo existirá, con fines de control y seguimiento del Plan de Seguridad y Salud, un libro de incidencias que constará de hojas por duplicado y que será facilitado por el Colegio Profesional al que pertenezca el técnico que haya aprobado el Plan de Seguridad y Salud.

El libro deberá mantenerse siempre en obra y en poder del Coordinador; tendrán acceso la Dirección Facultativa, Adjudicatario y subcontratistas, trabajadores autónomos, personas con responsabilidades en materia de prevención de las empresas intervinientes, representantes de los trabajadores y los técnicos especializados en las Administraciones públicas competentes en la materia, pudiendo realizar anotaciones en el mismo.

2.6.7 Conclusiones

Con lo recogido en los apartados que componen el estudio básico de seguridad y salud quedan estipuladas las medidas de prevención que en un primer momento se asumen como necesarias para la ejecución de las diferentes obras que se requieren para la construcción de la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de bioetanol.

En el supuesto de realizar algún cambio, o que se modificase algún procedimiento constructivo implicado en el seno de la obra, es obligado indicar por escrito las interacciones entre ambas circunstancias en las medidas de prevención contenidas en el actual estudio básico de seguridad y salud, así como las variaciones necesarias.

3. Bibliografía

Aclaración: en orden de aparición en los estudios con entidad propia.

Orol San Miguel A, Pan Martínez M, Rodríguez Brea I, Gallego González J. *Estudo do impacto ambiental na produccion de ácido sulfúrico – Porto de Bilbao*. Febrero de 2014. [Asumido como modelo de elaboración]

España. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 11 de diciembre de 2013, número 296. Disponible online en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-12913>

Falcke H, Holbrook S, Clenahan I, López Carretero A, Sanalan T, Brinkmann T, Roth J, Zenger B, Roudier S, Delgado Sancho L. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Large Volume Organic Chemicals*. EUR 28882 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-76589-6, doi:10.2760/77304, JRC109279.

Unión Europea. Decisión de Ejecución UE 2017/2117 de la Comisión, de 21 de noviembre de 2017, por la que se establecen las conclusiones sobre las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) conforme a la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo en la industria química orgánica de gran volumen de producción. Diario Oficial de la Unión Europea, de 7 de diciembre de 2017. L323/1, texto pertinente a efectos del EEE.

CURTIS INDUSTRIAL. *Página web oficial del Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro*. [sitio web, consultado en febrero 2018]. Disponible online en: <http://www.curtis-industrial.com/>

CLIMATE DATA.ORG. *Clima: Teixeira*. [sitio web, consultado en febrero 2018] Disponible online en: <https://es.climate-data.org/location/468759/>

BREEZ-O-METER. *Real Time-Air quality at Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro*. [sitio web, consultado en mayo 2018]. Disponible online en: <https://bit.ly/2sf9AnC>

DANISH CENTRE FOR ENVIRONMENT AND ENERGY. *Conversion between $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and ppb*. [sitio web, consultado en mayo de 2018]. Disponible online en: <https://bit.ly/2JdVCMA>

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. *Aplicación de atlas eólico*. [sitio web, consultado en mayo de 2018]. Disponible online en: <http://atlaseolico.idae.es/index.php?pag=introduccion>

España. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 29 de enero de 2011, número 25. Disponible online en: <https://bit.ly/2gzCLeW>

España. Real Decreto 678/2014, de 1 de agosto, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. [Sitio web,

consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 25 de agosto de 2014, sección I, núm. 206, pp. 68026-68027. Disponible online en: <https://bit.ly/2lYr4v0>

España. Real Decreto 39/2017, de 27 de enero, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 28 de enero de 2017, sección I, núm. 24, pp. 6918-6930. Disponible online en: <https://bit.ly/2sfQqOC>

España. Real Decreto 101/2011, de 28 de enero, por el que se establecen las normas básicas que han de regir los sistemas de acreditación y verificación de las emisiones de gases de efecto invernadero y los datos tonelada-kilómetro de los operadores aéreos y de las solicitudes de asignación gratuita transitoria de instalaciones fijas en el ámbito de aplicación de la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 29 de enero de 2011, sección I, núm. 25, pp. 9569-9573. Disponible online en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-1644>

España. Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 23 de octubre de 2007, número 254. Disponible online en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-18397>

España. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. [Sitio web, consultado en mayo de 2018]. Boletín Oficial del Estado, de 18 de noviembre de 2003, número 276. Disponible online en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-20976>

España. Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 20 de octubre de 2015, sección I, núm. 251, pp. 97531-97567. Disponible online en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-11268

España. Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que sea prueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ-1 hasta MIE APQ-7. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 10 de mayo de 2001, sección I, núm. 112, pp. 16838-16929. Disponible online en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-8971>

España. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 10 de noviembre de 1995, número 269. Disponible online en: <https://bit.ly/Yt1y9K>

España. Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz Básica de protección civil para el control y la planificación ante el riesgo de accidentes

graves en los que intervienen sustancias peligrosas. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 9 de octubre de 2003, sección I, núm. 242, pp. 36428-36471. Disponible online en: <https://bit.ly/2L3LvHf>

España. Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y de salud en las obras de construcción. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 25 de octubre de 1997, sección I, núm. 256, pp. 30875-30886. Disponible online en: <https://bit.ly/2IJZGAD>

España. Real Decreto 773/1997 de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 12 de junio de 1997, sección I, núm. 140, pp. 18000-18017. Disponible online en: <https://bit.ly/2IJm5xT>

España. Real Decreto 485/1997 de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en trabajo. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 23 de abril de 1997, sección I, núm. 97, pp. 12911-12918. Disponible online en: <https://bit.ly/2GKAvw0>

España. Orden de 9 de marzo de 1971 por la que se aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo. [Sitio web, consultado en mayo de 2018] Boletín Oficial del Estado, de 16 de marzo de 1971, sección I, núm. 64, pp. 4303-4314. Disponible online en: <https://bit.ly/2GMgndM>

DOCUMENTO V: PRESUPUESTO

Contenido

1. Introducción 2

2. Coste de los equipos 3

3. Actualización y conversión de los precios 6

4. Determinación de los presupuestos parciales 7

 4.1 Desglose de las diferentes partidas 8

 4.2 Presupuesto total 11

5. Bibliografía 12

1. Introducción

En este documento se detalla el presupuesto necesario para ejecutar la obra y la puesta en marcha de la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol. Con este propósito se determinará la inversión inicial teniendo en cuenta el siguiente desglose, que integra de manera conjunta el presupuesto total:

- Equipamiento principal: es la base del método factorizado que se utiliza para desglosar los diferentes presupuestos parciales. En función del coste de entrega de los equipos de proceso que integran la planta se calculará el presupuesto total.
- Instalación de equipos: se tiene en cuenta el factor humano y el coste del material de obra para efectuar la construcción de la planta.
- Tuberías, valvulería, aislamiento y pinturas: se incluyen los costes asociados a las conexiones entre equipos, así como los aislamientos necesarios y las capas de pintura necesarias para las diferentes unidades de proceso.
- Instrumentación y control: aglutina todos los costes asociados a los lazos de control del proceso, tanto los elementos de conexión como los diferentes instrumentos destinados a la medida, control y actuación. También se considera el precio pagado por la configuración de bus de campo/sistema de control distribuido empleado.
- Instalación eléctrica: tiene en cuenta los costes ligados al cableado para equipos que requieran de electricidad para su funcionamiento, así como los diferentes procesos vinculados a su montaje.
- Utilidades: tiene en cuenta el coste de las unidades de proceso encargadas de generar las diferentes utilidades que permiten el correcto funcionamiento de la planta de proceso, desde calderas para generar vapor de baja/media/alta presión a compresores a unidades destinadas al tratamiento de efluentes, así como compresores para las líneas de aire comprimido utilizadas en la instrumentación y control.
- *Off-site*: engloba la logística necesaria para la correcta operación de la planta de proceso, como son instalaciones de almacenamiento que albergan tanques, edificios auxiliares con múltiples propósitos o redes de comunicación.
- Edificios: considera los edificios de la propia área de proceso, así como oficinas destinadas a la administración, contabilidad, aparcamientos para el personal de planta, cafetería, zonas de descanso...
- Acondicionamiento del terreno: bajo esta partida se engloba el coste de las obras necesarias para la preparación de las parcelas que conforman el solar antes de la propia colocación de los equipos. Con frecuencia, es necesario recurrir a operaciones de nivelación y excavaciones.

Todas las partidas anteriores forman parte de los considerados costes directos, que junto al coste de compra de las parcelas (basado en el precio del suelo industrial)

constituyen el denominado capital necesario para la instalación del equipamiento. Para determinar el total del capital inmovilizado se deben considerar los costes indirectos, que incluyen los gastos asociados a la ingeniería, diseño, elaboración de proyectos y construcción, así como el fondo de contingencias obligatorio para hacer frente a cualquier hándicap que surja durante el periodo que transcurre entre los proyectos previos de construcción de la planta y la instalación de la batería de proceso y los elementos anexos.

Finalmente, el presupuesto deducido también ha de considerar la puesta en marcha de la planta de proceso definiendo la inversión necesaria para operar la planta bajo la suposición de retraso en los pagos y mantenimiento de los inventarios: bajo el capital circulante se estima la cantidad monetaria para llenar los tanques y realizar los primeros pagos a proveedores, al personal o a la deuda contraída con la entidad financiera y con los primeros clientes.

La suma del total del capital inmovilizado y el capital circulante permite obtener el presupuesto total. Dado que para su estimación se utilizan dimensionamientos básicos del equipamiento incluido en el proceso con base en los balances de materia y de energía (la información presentada en el PFD) para posteriormente aplicar un método factorizado, se dice que el presupuesto es de clase IV con una precisión probable de $\pm 30\%$. Por ello, este documento no debe considerarse como el presupuesto final de la planta de proceso, sino como una estimación de la inversión necesaria que se podría utilizar en etapas de discriminación de alternativas con el propósito de evitar esfuerzos de tiempo y dinero en proyectos sin buen potencial económico.

Por lo tanto, en una primera parte se calculará el coste del equipamiento utilizado en la planta de producción y con el valor obtenido se aplicará el método factorizado para la deducción de las inversiones parciales que integran el presupuesto total.

2. Coste de los equipos

La estimación del coste de los equipos se realiza mediante el método explicitado en el *Chemical Engineering Design. Principles, practice and economics of plant and process design* de Sinnott y Towler en el capítulo destinado a la estimación de costes de capital. La correlación empleada sigue una forma de la ley de la potencia:

$$C_e = a + b \cdot S^n \quad (1)$$

en donde los parámetros a y b y el exponente n son constantes relativas al tipo de equipamiento del cual se quiere estimar el coste y S hace referencia a un parámetro de dimensionado, cuyas dimensiones y unidades se explicitan en la tabla 1. El coste del equipamiento C_e determinado de esta manera hace referencia a la cantidad a depositar en dólares enero del 2006 (Índice CE=478.6) por lo que para extrapolar los datos a la actualidad para la planta en cuestión será necesario hacer un par de cálculos previos.

Tabla 1: Parámetros necesarios para la estimación del coste de equipamiento (Sinnott)

Equipamiento	a	b	Parámetro S (uds)	n
Intercambiador calor C&T	11000	115	Área, m ²	1.0
Evaporador <i>kettle</i>	14000	83	Área, m ²	1.0
Reactor encamisado	14000	15400	Volumen, m ³	0.7
Recipiente a presión	-400	230	Masa carcasa, kg	0.6
Platos de orificios	100	120	Diámetro, m	2.0
Bomba centrífuga	3300	48	Flujo, L/s	1.2
Motor bomba	920	600	Potencia, kW	0.7
Compresor reciprocante	240000	1.33	Potencia, kW	1.5

La tabla 1 solamente es aplicable para equipos con capacidades (parámetro S en la tabla) comprendidas en los límites presentados a continuación en la tabla 2:

Tabla 2: Capacidades inferiores y superiores para la aplicación de la Ecuación 1 (Sinnott)

Equipamiento	S _{inferior}	S _{superior}
Intercambiador calor C&T	5 m ²	1000 m ²
Evaporador <i>kettle</i>	10 m ²	500 m ²
Reactor encamisado	0.5 m ³	100 m ³
Recipiente a presión	150 kg	69200 kg
Platos de orificios	0.5 m	5 m
Bomba centrífuga	0.2 L/s	500 L/s
Motor bomba centrífuga	1 kW	2500 kW
Compresor reciprocante	100 kW	16000 kW

Estos costes están asociados a equipamiento construido con acero al carbono; en el caso de la planta de producción de acetato de etilo se ha justificado la elección de un acero al carbono de baja aleación (ASTM A387 Grado 22) para la construcción del reactor catalítico heterogéneo R-201; por cuestiones de comodidad, se utiliza esta aleación para el resto de equipamiento de la planta. Para tener en cuenta este sobrecoste se utilizan los factores presentados en la tabla 3.

Tabla 3: Factores de material para sobrecostes (Sinnott)

Material de construcción	f _m
Acero al carbono	1.0
Acero fundido de baja aleación	1.1
Aceros inoxidables	1.4
C Hastelloy	1.55
Nickel e Inconel	1.7

Para la determinación de los costes de las torres de purificación, se estima el coste de un recipiente a presión vertical, de los platos (teniendo en cuenta que los parámetros de la correlación presentados en la Tabla 1 se aplican al coste por plato basado en un *stack* de 30 platos), del condensador total del destilado y del calderín parcial de fondos de la columna, considerando estos dos últimos como intercambiadores de calor de carcasa y tubos y como evaporador *kettle* respectivamente.

Con el propósito de la estimación de los costes de la bomba centrífuga se tiene en cuenta el coste del cuerpo de la bomba y del elemento eléctrico de impulsión (considerado como motor a prueba de explosiones). Finalmente, el coste de la columna de destilación azeotrópica T-401 se estima como el doble del precio de las dos torres de purificación, ya que estas dos últimas trabajan con los caudales de destilado y fondos de la T-401, que además presenta dos alimentaciones al trabajar con un *entrainer*. Los costes estimados para la adquisición de los diferentes equipos se recogen en la tabla 4.

Tabla 4: Estimación de costes para el equipamiento principal de la planta de producción de acetato de etilo

Equipamiento	C _e estimado (\$)
Bomba centrífuga P-101 A/B	16 111.24 \$
Intercambiador de calor C&T E-101	16 363.05 \$
Evaporador <i>kettle</i> E-102	22 028.38 \$
Intercambiador de calor C&T E-103	12 700.88 \$
Reactor catalítico heterogéneo R-201	312 990.65 \$
Intercambiador de calor C&T E-201	19 123.28 \$
Compresor reciprocante K-301	265 707.22 \$
Intercambiador de calor C&T E-301	23 194.05 \$
Tanque flash V-301	14 437.17 \$
Columna destilación azeotrópica T-401	195 374.65 \$
Tanque flash V-401	28 529.35 \$
Intercambiador de calor E-401	15 325.75 \$
Torre de purificación de reciclo T-402	54 530.90 \$
Torre de purificación de producto T-403	43 156.42 \$
TOTAL	1 039 572.98 \$

La suma total de los costes estimados para el equipamiento es de 1 039 572.98 \$, precio correspondiente a enero de 2006. El dimensionamiento básico de los equipos (a excepción del reactor catalítico heterogéneo), así como la metodología de cálculo, se adjunta en el último punto del Anexo II. Cálculos Justificativos.

3. Actualización y conversión de los precios

Una vez estimado el precio total del equipamiento es conveniente actualizarlo al presente para tener en cuenta en su justa medida los fenómenos de inflación, que son el aumento generalizado y sostenido del nivel de precios existentes en el mercado durante el periodo temporal de un año, de tal manera que ante una subida de precios con cada unidad de moneda se adquieren menos bienes y servicios.

La variación de los precios con el tiempo a nivel industrial se recoge empleando índices; uno de los más importantes a escala industrial es el publicado por la revista estadounidense *Chemical Engineering*, conocido como *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI), cuya primera estipulación data de 1958 con un valor de Índice CE de 100. La información relativa al índice de precios está codificada; no obstante, en este caso se dispone del índice CE para febrero de 2018 ya que:

- Se encuentra un archivo en el cual se muestra el índice CE final para febrero de 2017.
- Se lee en la propia revista que el CEPCI en febrero de 2018 está un 4.1% por encima de su valor en el mismo mes del año pasado.

Mediante una simple operación aritmética se llega a la conclusión de que el índice CE que se va a utilizar para tener en cuenta los fenómenos de inflación es 581.19. Por lo tanto, el precio a febrero de 2018 se infiere utilizando la siguiente relación:

$$C_{e,2018} = \frac{I_{CE,2018}}{I_{CE,2006}} \cdot C_{e,2006} \quad (2)$$

Los costes estimados mediante la ecuación (1) y actualizados a día de hoy empleando la relación (2) se ven sometidos al cambio de divisa, ya que la primera de las ecuaciones está desarrollada para estimar costes en dólares. Teniendo en cuenta la situación sociopolítica actual, en el que el dólar está devaluado en comparación con el euro, la situación es claramente ventajosa para adquirir el equipamiento con la moneda comunitaria -ya que un dólar US equivale a 0.84 €-. Los datos utilizados, así como la estimación final, se recogen en la tabla 5.

Tabla 5: Estimación de costes de equipamiento actualizada y en la divisa que aplica

Parámetro	Valor
Índice CE febrero 2018	581.19
Índice CE enero 2006	478.60
\$/€	0.84
Coste actualizado del equipamiento (€)	1 060 424.39

4. Determinación de los presupuestos parciales

Para el cálculo de los presupuestos parciales se emplean factores que tienen en cuenta el precio de los equipos libre a bordo (FOB, *free of board*), que se trata del precio de los equipos que incluye los costes de equipo como los derivados de la potencial carga en un buque: carga en un contenedor, transporte hasta puerto, trámites aduaneros en país de origen y gastos de logística portuaria. Los factores serán diferentes en función de la partida que aplique:

$$\text{Presupuesto total} = f_i \sum_i C_{e,i} \quad (3)$$

en donde el factor global para la instalación, f_i , se desglosa en la tabla 6. Hay que tener en cuenta que los valores mostrados designan el funcionamiento de una planta en la que predomina el procesamiento de fluido. Lógicamente las diferentes partidas coinciden con la introducción teórica realizada en el primer apartado del presupuesto:

Tabla 6: Factores típicos para la estimación de coste de capital basados en la entrega de equipamiento (R. Smith)

Partida	Nomenclatura f_i	Valor del factor
Compra y entrega del equipamiento	-	1.0
Instalación del equipamiento	f_{ER}	0.4
Conducciones, aislamientos, pintura	f_{PIP}	0.7
Instrumentación & Control	$f_{I\&C}$	0.2
Instalación eléctrica	f_{ELEC}	0.1
Utilidades	f_{UTIL}	0.5
<i>Off-sites</i>	f_{OS}	0.2
Edificios	f_{BUILD}	0.2
Preparación del solar	f_{SP}	0.1
Diseño, ingeniería y construcción	f_{DEC}	1.0
Fondo de contingencias	f_{CONT}	0.4
Capital circulante	f_{WC}	0.7

Para la aplicación de estos factores, es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones:

- Están basados en acero al carbono y en unas condiciones de presión y temperatura moderadas.
- Valores medios para cualquier tipo de equipamiento, cuando en la práctica los valores variarán para un intercambiador y para un reactor, por ejemplo.
- Únicamente las guías y los componentes individuales cambiarán de proyecto a proyecto.
- Factores aplicables solamente en etapas primigenias de diseño, no tiene mayor validez que el de una simple estimación.

Por lo tanto, con el coste de adquisición y entrega del equipamiento deducido, actualizado y convertido a la divisa correspondiente, la determinación de los presupuestos parciales es sencilla con la aplicación del método factorizado.

4.1 Desglose de las diferentes partidas

Tabla 7: Desglose de compra, entrega e instalación del equipamiento

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Adquisición y entrega	Compra Logística	Partida alzada	1 060 424.39
Instalación de equipos	Cimentaciones Materiales y maquinaria Mano de obra Montaje	Partida alzada	424 169.76
TOTAL (€)			1 484 594.14

Tabla 8: Desglose de instalación de conducciones, accesorios, aislamientos y pinturas

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Tuberías	Materiales conducciones		
	Valvulería		
	Aislamiento	Partida alzada	742 297.07
	Pinturas Montaje		
TOTAL (€)			742 297.07

Tabla 9: Partida de instrumentación y control en el presupuesto global

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Instrumentación & Control	Materiales		
	Instrumentos		
	Programación Montaje	Partida alzada	212 084.88
TOTAL (€)			212 084.88

Tabla 10: Montante de instalación eléctrica en el presupuesto global

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Montaje eléctrico	Cableado		
	Materiales	Partida alzada	106 042.44
	Instalación		
TOTAL (€)			106 042.44

Tabla 11: Partida de utilidades en el presupuesto global

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Utilidades	Instalaciones eléctricas	Partida alzada	530 212.19
	Instalaciones de vapor		
	Agua de proceso		
	Agua de refrigeración		
	Agua contra incendios		
	Aire comprimido		
	Tratamiento de efluentes		
TOTAL (€)			530 212.19

Tabla 12: Desglose de off-sites en el presupuesto total

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Off-site	Edificios auxiliares	Partida alzada	212 084.88
	Carreteras y accesos		
	Protección contra incendios		
	Logística de comunicaciones		
	Sistemas de eliminación de residuos		
	Almacenamientos de productos		
	Vehículos en planta		
	Dispositivos de carga		
TOTAL (€)			212 084.88

Tabla 13: Desglose de infraestructuras en el presupuesto total

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Edificios de proceso	Edificio principal	Partida alzada	212 084.88
	Servicios		
TOTAL (€)			212 084.88

Tabla 14: Partida de acondicionamiento de las parcelas

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Preparación del solar	Excavaciones	Partida alzada	106 042.44
	Nivelaciones		
	Limpieza de la superficie		
	Deshidratación y drenaje		
	Movimientos de tierra		
TOTAL (€)			106 042.44

Todas las partidas introducidas hasta el momento engloban los considerados costes directos, cuyo factor (definido como la suma de los factores de las distintas partidas implicadas) es de 3.4. En la siguiente tabla se desglosan los conocidos como costes indirectos (considerados bajo un factor total de 1.4):

Tabla 15: Desglose de costes indirectos en el presupuesto global de la planta

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
	Diseño		
Diseño, ingeniería y construcción	Ingeniería Elaboración de proyectos	Partida alzada	1 060 424.39
	Construcción		
Fondo de contingencias	Dinero destinado a sucesos no contemplados	Partida alzada	424 169.76
TOTAL (€)			1 484 594.14

La suma de los costes directos e indirectos, junto al coste de compra del solar (se adquieren parcelas que suman un global de 30 000 m² al precio de venta del suelo industrial en el Polígono Industrial de Curtis-Teixeiro, 53 €/m²) constituyen el denominado capital inmovilizado, o inversión a realizar para la instalación de la planta de producción:

Tabla 16: Partida de compra de las parcelas donde se instalará la planta de producción

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Compra solar	Adquisición parcelas	Precio suelo industrial	1 590 000.00
TOTAL (€)			1 590 000.00

Finalmente, también se realiza el desglose del dinero necesario al comienzo de la vida útil de la planta, cuando es necesario sufragar los gastos en los que se incurre sin generar beneficios por la venta de productos y subproductos; es el conocido como capital circulante, que se detalla a continuación.

Tabla 17: Desglose del capital circulante necesario para la puesta en marcha de la planta

Ítem	Descripción	Medición	Precio (€)
Capital circulante	-	Partida alzada	742 297.07
TOTAL (€)			742 297.07

4.2 Presupuesto total

El presupuesto total estimado para la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol no es más que la suma de las diferentes partidas consideradas. En la tabla 18 se presenta el presupuesto total de la obra:

Tabla 18: Estimación del presupuesto global de la planta de producción

Partida parcial del presupuesto	Importe (€)
Equipamiento entregado	1 060 424.39 €
Instalación de equipos	424 169.76 €
Conducciones, aislamientos, pinturas	742 297.07 €
Instrumentación & Control	212 084.88 €
Montaje eléctrico	106 042.44 €
Utilidades	530 212.19 €
<i>Off-site</i>	212 084.88 €
Edificios	212 084.88 €
Acondicionamiento del solar	106 042.44 €
Diseño, ingeniería y construcción	1 060 424.39 €
Fondo de contingencias	424 169.76 €
Compra de las parcelas	1 590 000.00 €
Capital circulante	742 297.07 €
TOTAL (€)	7 422 334.13 €

El presupuesto clase IV de construcción de la planta de producción de acetato de etilo mediante deshidrogenación catalítica de etanol asciende a la cantidad de SIETE MILLONES CUATROCIENTOS VEINTIDÓS MIL TRESCIENTOS TREINTA Y CUATRO CON TRECE (7 422 334.13) EUROS.

Santiago de Compostela, a 2 de julio de 2018

El autor del proyecto,

Carlos Manuel Corral Casas.

5. Bibliografía

CHEMICAL ENGINEERING: ESSENTIALS FOR THE CPI PROFESSIONAL. 2018 CEPCI Updates: March (prelim.) and february (final) [sitio web, consultado en mayo 2018] Disponible online en: <http://www.chemengonline.com/2018-cepci-updates-march-prelim-and-february-final/>

ECONOMIC INDICATORS. CEPCI June 2017 Issue. [sitio web] Chemical Engineering Journal, publicado en febrero 2017 [Consultado en mayo 2018]. Disponible online en: <https://es.scribd.com/document/352561651/CEPCI-June-2017-Issue>

IGAPE: INSTITUTO GALEGO PARA A PROMOCIÓN ECONÓMICA. Suelo industrial: parque empresarial de Curtis (Teixeiro). [sitio web] Actualizado a abril de 2016 [consultado en mayo 2018]. Disponible online en: <http://www.igape.es/es/investigalicia-suelo-industrial/ficha/21>

SINNOTT R, TOWLER G. *Chemical Engineering Design. Principles, practice and economics of plant and process design*. 1ª edición. San Diego, CA, USA: Ed. Elsevier, 2008, ISBN 13: 978-0-506-8423-1.

SMITH R. *Chemical Process Design and Integration*. 1ª edición. West Sussex, Inglaterra, UK: Ed. John Wiley & Sons, 2005, ISBN: 0-471-48680-9.

TURTON R, BAILIE R, WHITING W, SHAEIWITZ J. *Analysys, Synthesis and Design of Chemical Processes*. 3ª edición. USA: Ed. Pearson Education, 2009, ISBN-10: 0-13-512966-4.